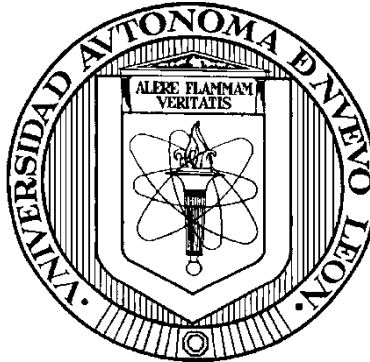


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**COMPORTAMIENTO DEL CONTRASTE DE PRECIPITACIONES**

**ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR)**

**Y LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO.**

**Por**

**RAÚL GUZMÁN SAGREIROS**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en  
Ingeniería Ambiental**

**NOVIEMBRE, 2014.**



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FIC**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, U.A.N.L.**  
**Presente.-**

**Estimado Dr. Juárez:**

Por medio de la presente le informo que el **Ing. Raúl Guzmán Sagreiros**, pasante de la Maestría, ha concluido su trabajo de titulación de Tesis titulado **"COMPORTAMIENTO DEL CONTRASTE DE PRECIPITACIONES ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR) Y LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO"**, el cual es como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente  
"Alere Flammam Veritatis"  
Ciudad Universitaria, 31 de Octubre de 2014

**M.C. RICARDO ALBERTO CAVAZOS GONZALEZ**  
**DIRECTOR DE TESIS**

C.c.p



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. CÉSAR A. JUÁREZ ALVARADO**  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, U.A.N.L.  
Presente.-

**Estimado Dr. Juárez:**

Por medio de la presente le informo que el **Ing. Raúl Guzmán Sagreiros**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, ha concluido su trabajo de Tesis titulado ***“Comportamiento del contraste de precipitaciones asociados a un período de retorno ( $T_r$ ) y los índices de cambio climático”*** la cual fue realizada bajo la co-dirección de su servidor, por lo que no existe ningún inconveniente en atender la solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución. Por lo tanto, agradeceré se informe al Ing. Guzmán Sagreiros para que inicie los trámites correspondientes.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

**Atentamente**  
**“Alere Flammam Veritatis”**  
Cd. Universitaria a 30 de octubre de 2014

**Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián**  
Co-director de tesis



*“Educación de clase mundial,  
un compromiso social”*

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66451  
Tel:1442 4400 Fax:1442 4443  
<http://www.fic.uanl.mx>

**DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.**  
**Presente.-**

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Evaluador de la Tesis titulado **“COMPORTAMIENTO DEL CONTRASTE DE PRECIPITACIONES ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR) Y LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO”**, que presenta el **Ing. Raúl Guzmán Sagreiros**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE,



**M.C. AMALIO CARDONA RODRIGUEZ**  
**EVALUADOR**

## **RESUMEN.**

**Raúl Guzmán Sagreiros**

**Fecha de graduación: Noviembre, 2014**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**Título del Estudio: COMPORTAMIENTO DEL CONTRASTE DE PRECIPITACIONES ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR) Y LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**Número de páginas: 82**

**Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental**

**Área de Estudio: Ingeniería Hidráulica**

**Propósito y método del estudio:** En este trabajo se presenta el comportamiento del contraste de precipitaciones asociados a un período de retorno ( $T_r$ ) y los índices de cambio climático. El presente estudio está basado en información de 65 estaciones climatológicas distribuidas en Nuevo León, México. La metodología consiste en comparar la metodología propuesta por Campos (1990), utilizada en nuestra región para la obtención de las curvas de intensidad-duración-período de retorno (I-D- $T_r$ ), y los índices de cambio climático definidos por el ETCCDMI (Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices), utilizados para determinar la tendencia del clima, de acuerdo con las normales climatológicas definidas por la OMM (Organización Meteorológica Mundial). El análisis de las tendencias detectadas para las precipitaciones ratifica el incremento de lluvias intensas de poca duración para la mayoría de las estaciones localizadas en la región.

**Conclusiones:** En general, la aplicación de esta metodología comprobó la variación de las precipitaciones pluviales para el estado de Nuevo León, lo que permitirá tomar decisiones eficaces al momento de diseñar las obras y estructuras hidráulicas necesarias para el manejo, control y regulación de los escurrimientos superficiales.

**FIRMA DEL ASESOR:** \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTOS.**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis el M.C. Ricardo Alberto Cavazos González y al co-director, el Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián por el apoyo, paciencia, asesoría y valiosas sugerencias que me brindaron en estos dos años de arduo trabajo en mi tema de investigación, aunque el camino estuvo lleno de tropiezos, salimos adelante.

También agradezco al Departamento de Hidráulica del Instituto de Ingeniería Civil, por el apoyo brindado en espacio y material necesario, ya que, sin su apoyo no se habría logrado.

Así mismo, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me otorgó para la realización de estos estudios.

Por otro lado, quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres Raúl Guzmán S. y María Julia Sagreiros P. por apoyarme en todo momento, desde el momento que decidí llevar esta etapa de mi vida; por darme sus valiosos consejos, por acompañarme en los momentos que pensaba que ya no podía seguir, por enseñarme los valores que hoy rigen mi forma de ser, por darme la oportunidad de ser y expresarme, así como la oportunidad de darme una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por enseñarme a nunca darme por vencido aun cuando las circunstancias lo ameritaban, y salir siempre con la cara en alto. También quiero agradecer a mis hermanos, Izthar Guzmán R., Antonio Guzmán R. y Ayax Guzmán S., que siempre están cuando los necesito, ser parte importante de mi vida y llenar mi vida de alegrías y amor.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer a mi novia Julia María Armendáriz M. que, a pesar de todo, siempre se mantuvo a mi lado motivándome y sermoneándome para salir adelante y terminar esta etapa. Quiero agradecerle que, sin ella, esto no hubiera sido posible, ya que siempre fue, es y será una parte muy importante de mi vida, estar conmigo en las buenas y las malas, pero, sobre todo, por su paciencia y amor incondicional. T. A. Preciosa.

**DEDICATORIA.**

**A mis padres**

***Raúl Guzmán Salazar y María Julia Sagreiros Pérez***

**Por su amor, trabajo y sacrificio.**

**A mis hermanos**

***Izthar, Antonio y Ajax Guzmán***

**Por estar siempre presentes, acompañándome.**

**A mi novia**

***Julia María Armendáriz M.***

**Por su paciencia y apoyo incondicional.**

**CONTENIDO.**

INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	3
1.2.1. El cambio climático.....	3
1.2.2. América Latina.....	5
1.2.3. Índices de cambio climático.....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.4. HIPÓTESIS.....	21
1.5. OBJETIVOS:.....	21
EL MÉTODO.....	23
2.1. LA ZONA EN ESTUDIO.....	23
2.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS.....	26
2.2.1. Selección de las estaciones.....	26
2.2.2. Actualización de los datos.....	27
2.2.3. Control de calidad y homogeneidad de los datos.....	28
2.2.4. Datos faltantes.....	30
2.3. PROCESO 1. DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ASOCIADA A UN PERÍODO DE RETORNO (TR).....	35
2.3.1. Pruebas de bondad de ajuste.....	35
2.3.2. Distribuciones de probabilidad.....	37
2.3.3. Cociente lluvia-duración (r).....	39
2.3.4. Curvas I-D-TR.....	40
2.4. PROCESO 2. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR).....	42



2.4.1. Índices de cambio climático.....	42
2.4.2. Predicción.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
3.1. LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	46
3.2. HOMOGENEIDAD Y CALIDAD DE LOS DATOS.....	49
3.2.1. Estación climatológica 19004.....	50
3.3. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS I-D-TR Y HP-D-TR.....	54
3.3.1. Estación climatológica 19004.....	57
3.4. CONTRASTE DE PRECIPITACIONES CONTRA LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	80
CONCLUSIONES.....	88
RECOMENDACIONES .....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
ANEXOS .....	98
A.- ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE SERIES TEMPORALES CON “R” .....	98
B.- CÓDIGOS EN R.....	103
RESUMEN AUTOBIOGRAFICO.....	108

**ÍNDICE DE FIGURAS.**

Figura 1. Tendencia de la temperatura media anual (°C/100 años) en México.....	9
Figura 2. Contraste entre el desarrollo y la disponibilidad del agua. ....	11
Figura 3. Distribución de la precipitación anual en México, del 1941 a 2008. ....	11
Figura 4. Mapa de la República Mexicana, donde se localiza el Estado de Nuevo León. ....	23
Figura 5. Pasos para la evaluación del contraste.....	25
Figura 6. Procedimiento de actualización de datos. ....	27
Figura 7. Datos diarios de precipitación. ....	28
Figura 8. Evaluación de la homogeneidad. ....	29
Figura 9. Interfaz RClimdex.....	30
Figura 10. Interfaz RHtest. ....	30
Figura 11. Valores de los parámetros a, b y c, en función de R.....	41
Figura 12. Proceso de construcción de modelos ARIMA. ....	44
Figura 13. Homogeneidad con base irregular (a) y serie base (b). ....	51
Figura 14. Control de calidad de la serie de datos. ....	52
Figura 15. Control de calidad de la serie de datos (Continuación).....	53
Figura 16. Modelo ARIMA aplicado para cada índice de cambio climático. ....	56
Figura 17. Precipitación Máxima en 24 Horas - Completada (ajuste método gráfico). .....	58
Figura 18. Rx1day (ajuste método gráfico). ....	59
Figura 19. Precipitación máxima acumulada en 5 días (ajuste método gráfico)....	60
Figura 20. Rx5day (ajuste método gráfico). ....	61
Figura 21. Precipitación total anual (ajuste método gráfico).....	62
Figura 22. PRCPTOT (ajuste método gráfico).....	63
Figura 23. Gráfica índice Rx1day.....	65
Figura 24. Gráfica índice Rx5day.....	66
Figura 25. Gráfica índice PRCPTOT.....	67

Figura 26. Gráficas de autocorrelación y autocorrelación parcial del índice Rx1day. .....	69
Figura 27. Gráficas del modelo aplicado del índice Rx1day.....	70
Figura 28. Resultados de la precipitación máxima en 24 horas. ....	74
Figura 29. Resultados de la precipitación máxima acumulada en 5 días. ....	75
Figura 30. Resultados de la precipitación total anual. ....	76
Figura 31. Resultados del índice Rx1day. ....	77
Figura 32. Resultados del índice Rx5day. ....	78
Figura 33. Resultados del índice PRCPTOT. ....	79
Figura 34. Porcentaje de estaciones que aumentan/disminuyen su precipitación pluvial. ....	80
Figura 35. Precipitación máxima en 24 horas Vs Índice Rx1day.....	85
Figura 36. Precipitación máxima acumulada en 5 días Vs Índice Rx5day. ....	86
Figura 37. Precipitación total anual Vs Índice PRCPTOT. ....	87

**ÍNDICE DE TABLAS.**

Tabla 1. Eventos extremos de precipitación en México. ....	13
Tabla 2. Eventos extremos de tormentas en México.....	14
Tabla 3. Resumen de los índices de cambio climático.....	17
Tabla 4. Densidad de estaciones (superficie, en km <sup>2</sup> por estación). ....	33
Tabla 5. Formato para cálculo de datos faltantes.....	33
Tabla 6. Distribuciones de frecuencia habitualmente utilizadas. ....	38
Tabla 7. Estaciones climatológicas seleccionadas.....	47
Tabla 8. Resultados del análisis de las estaciones climatológicas.....	55
Tabla 9. Resultados de las pruebas de bondad (ajuste). ....	57
Tabla 10. Resultados de los índices de cambio climático. ....	64
Tabla 11. Cociente lluvia-duración (r) y parámetros regionales a, b y c.....	73
Tabla 12. Contraste de precipitaciones máximas en 24 horas Vs Rx1day.....	81
Tabla 13. Contraste de precipitaciones máximas acumuladas en 5 días Vs Rx5day. .....	82
Tabla 14. Contraste de precipitación total anual Vs PRCPTOT. ....	83

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad el mundo entero está presentando cambios drásticos en su estado del tiempo, hemos notado que ahora los cambios de temperatura se acentúan más; es decir, cuando hace calor se siente con mayor intensidad que en el pasado; igual pasa en el tiempo de frío, aunque este suceso está meramente relacionado con el criterio de sensación de la población (exageraciones de unos, minimizaciones de otros), es un hecho irrefutable. La temperatura ha ido en incremento los últimos cien años, tal como se menciona en la Tercera, Cuarta y Quinta Comunicación Nacional (INE-SEMARNAT, 2007, 2009, 2012); no obstante, la temperatura no es la única indicadora sobre este acontecimiento. Otro indicador significativo es la precipitación pluvial, de la cual se puede observar que en años recientes se han presentado tormentas de mayor magnitud que las visualizadas en años anteriores (Chris & Slingo, 2011; Gobierno del Estado de Nuevo León, 2013), las que han provocado desastres naturales de gran envergadura. Aunque existen más indicadores para determinar el cambio climático que sucede en el mundo (p. ej. precipitación, mareas, deshielo de los polos, etc.), este trabajo sólo se centrará en la precipitación pluvial.

Para comprender el cambio climático, primero se debe entender el medio que nos rodea, sus cambios, y cómo éstos afectan a los humanos. Aún cuando el entorno y sus afectaciones están dentro del cambio climático, éste constituye toda

una rama cuya descripción ocuparía un volumen mayor que el presente; es por ello que se explicarán los puntos clave para poder guiar al lector y no encontrarse en total incapacidad de seguir leyendo este trabajo. Se ha de entender que las grandes ciudades de esta Era están enfrentando problemas de un manejo inadecuado de los recursos naturales; entre ellos, el recurso hídrico. Este hecho está directamente relacionado con los efectos del clima y su entorno, además de la toma de decisiones incongruentes con la realidad. De esta manera es posible imaginar que la sociedad actual no está preparada para enfrentar el futuro próximo. Es por ello, que se deben tomar medidas para desarrollar una infraestructura adecuada y eficiente, además de estar preparados para los eventos climáticos que se avecinen.

Entonces, para aminorar los problemas que genera el cambio climático, principalmente el exceso de lluvia y la extensa temporada de sequía en la región, es necesario concebir un método que permita evaluar el clima del futuro próximo, con la finalidad de prever eventos de una magnitud tal que sea posible aprovechar o mitigar. Claro, las tecnologías actuales deben ser de gran utilidad para lograr estos objetivos que, si bien, no es algo indispensable, sí es importante considerar para mejorar los métodos científicos actuales y obtener el mejor provecho de éstos.

Aunando a lo anterior, este trabajo no trata de dar la solución ideal u óptima a los problemas que genera el cambio climático, como: exceso de lluvia, inundaciones, sequía, temperaturas extremas, etc., pero sí de reflexionar que se deben evaluar y comparar las tendencias del clima actual y vincularlas con el futuro próximo para crear medidas de adaptación fiables.

## 1.2. ANTECEDENTES.

Es fácil afirmar que la vida en el planeta Tierra depende enteramente del agua, ya que el hombre la requiere para sus necesidades básicas, sus usos recreativos, para transformar energía, para uso agrícola, para manufacturas, etc., así como los seres vivos dependen de ella para su supervivencia. Además, debido al crecimiento de la población del mundo, tanto como la necesidad de mejorar en las condiciones de vida, para conseguir una vida de mejor calidad, se ha originado un aumento en la demanda de agua. Conjuntamente, la irregularidad en su distribución espacial y temporal, y la necesidad de construir grandes obras hidráulicas de protección, drenaje, almacenamiento, transformación, regulación, derivación y control. Por desgracia, no siempre es posible satisfacer todas las necesidades humanas y con frecuencia su escasez no permite disponer de la cantidad necesaria, generándose una crisis de nivel mundial (Campos, 1998).

### 1.2.1. El cambio climático.

En los últimos años, el término “Cambio Climático” ha tomado mayor auge, que de acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), define como “cualquier cambio en el clima producido durante el transcurso del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana”. Este hecho se atribuye a que cada día se hace más evidente debido a los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007).

No obstante, para describir estos fenómenos es necesario la observación de datos validados. Para tener una idea clara sobre cómo el cambio climático impactará, hay que entender el clima del pasado y del presente, ya que esto permitirá trabajar en el diseño de medidas de adaptación a los cambios en el clima.

*“Una sociedad que ha aprendido a adaptarse a las variaciones del clima del pasado reciente y del presente tiene más posibilidades de adaptarse a los cambios climáticos derivados del calentamiento global” (Vázquez, 2010).*

Si bien, es conocido que la naturaleza propia contamina, esto debido a los desastres naturales, tales como: terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, inundaciones, movimientos de tierras, vientos fuertes (tornados), sequía, etc.; todos éstos contaminan directamente al planeta, provocando la destrucción de ecosistemas enteros y, en el caso de las erupciones volcánicas, debido a los gases que emana, favorece el efecto invernadero en el planeta.

No obstante, en los seres humanos recae la principal responsabilidad del cambio climático mundial. Si bien, el planeta se encuentra en un ciclo de calentamiento y enfriamiento constante, los humanos inducen aún más este hecho. Y es que las actividades humanas (principalmente, el quemado de combustibles de origen fósil y los cambios en la utilización de las tierras y en la cubierta terrestre) están haciendo aumentar la concentración en la atmósfera de gases de efecto invernadero, que alteran los balances radiativos y tienden a calentar la atmósfera y, en algunas regiones, de aerosoles, que producen el efecto contrario sobre los balances radiativos y tienden a enfriar la atmósfera (IPCC, 1997).



Hace 30 años, la mayoría de los climatólogos eran escépticos acerca de la naturaleza antropogénica del cambio climático. Hoy en día, la inmensa mayoría de ellos reconoce una evidente huella humana en el intenso cambio climático ocurrido en los últimos cincuenta años (Martín Vide, 2007; Greenpeace, 2010).

#### 1.2.1.1. El papel de la naturaleza en el cambio climático.

Los ecosistemas terrestres y marinos desempeñan un papel importante en la regulación del clima. En la actualidad absorben aproximadamente la mitad de las emisiones de carbono de origen antropogénico; sin embargo, el cambio climático tiene repercusiones en la biodiversidad y los ecosistemas y a menudo exacerba otras presiones, como la contaminación, la sobreexplotación, las especies invasoras, y la fragmentación, degradación y pérdida de hábitats. Mientras que el cambio climático es actualmente un tema prioritario en la agenda pública, el nivel de preocupación por la pérdida de biodiversidad todavía es bajo (Comisión Europea, 2010).

*“Las especies que sobreviven no son las más fuertes, ni las más rápidas, ni las más inteligentes, sino aquéllas que se adaptan mejor al cambio” (WWF, 2012).*

#### 1.2.2. América Latina.

De acuerdo al informe “Cambio Climático 2007: Informe de síntesis” publicado por el IPCC, el aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores. Tanto el aumento del nivel del mar como la disminución observada de las extensiones de

nieve y de hielo concuerdan con dicho calentamiento. Así mismo, entre 1900 y 2005, la precipitación aumentó notablemente en las partes orientales del norte de América del Sur y del Norte. Por lo que es probable que la frecuencia de las precipitaciones intensas haya aumentado en la mayoría de las áreas.

América Latina abarca en el Continente a todos los países desde México hasta Argentina y Chile, así como sus mares adyacentes. Esta región es inmensamente heterogénea en cuanto a climas se refiere, así como en sus ecosistemas, la distribución de la población humana y las tradiciones culturales (IPCC, 1997). Los países centroamericanos y los pequeños estados insulares se consideran las zonas más vulnerables a nivel mundial. Esto se debe a su situación geográfica, un cordón de territorio bordeado por los océanos Atlántico y Pacífico, que hace que estén sujetos, en ocurrencia e intensidad, a fenómenos climáticos extremos, cuyos problemas se agravan con el aumento de lluvias intensas. Las medidas de adaptación pueden reducir la vulnerabilidad, especialmente cuando se enmarcan en iniciativas sectoriales más amplias. Se percibe una clara falta de información básica, de sistemas de observación y supervisión, debido a las condiciones de pobreza y al asentamiento de poblaciones en zonas muy vulnerables (Comisión Europea, 2009).

#### 1.2.2.1. Los recursos hídricos.

El agua es un componente necesario para la mayoría de los sectores socioeconómicos, y contribuye de muchas maneras diferentes a estos sectores. Por ejemplo, el sector agrícola requiere grandes cantidades de agua para la irrigación;

en el sector energía, especialmente las hidroeléctricas, requieren agua para las turbinas que generan electricidad, así como, las plantas termoeléctricas; asimismo, el sector público necesita un suministro de agua de calidad mínima necesaria para el uso doméstico, comercial e industrial, sin dejar atrás los sistemas de saneamiento. Los mayores beneficios de estos sectores dependen del agua.

*“The crucial factor for water governance is... the recognition that water is not only a sector” (WWAP, 2012).*

El cambio climático podría afectar de manera notable todos los sectores socioeconómicos, impactando directamente al ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución temporal y espacial de la precipitación, de la escorrentía de superficie y de la recarga de agua, produciendo impactos adversos sobre éstos (IPCC, 1997).

#### 1.2.2.2. México ante el cambio climático.

México se localiza en América del Norte y se encuentra entre las coordenadas 118°42' y 86°42' de longitud Oeste y 14°32'y 32°43' de latitud Norte. Está distribuido casi por partes iguales, a ambos lados del trópico de Cáncer. Al Norte colinda con los Estados Unidos de América, al Sureste con Guatemala y Belice, al Occidente limita con el Golfo de México y el Mar Caribe, mientras que al Poniente limita con el Océano Pacífico. México cuenta con una extensión territorial de 1.96 millones de km<sup>2</sup>. El 99.7% es continental y el 0.3% es insular.

El territorio nacional cuenta con una gran variedad de climas, siendo el 51% de la superficie mexicana de clima seco; mientras que para un clima cálido abarca el 25.9%; clima templado un 23% y solamente el 1% es de clima frío, de acuerdo con las estadísticas del INEGI.

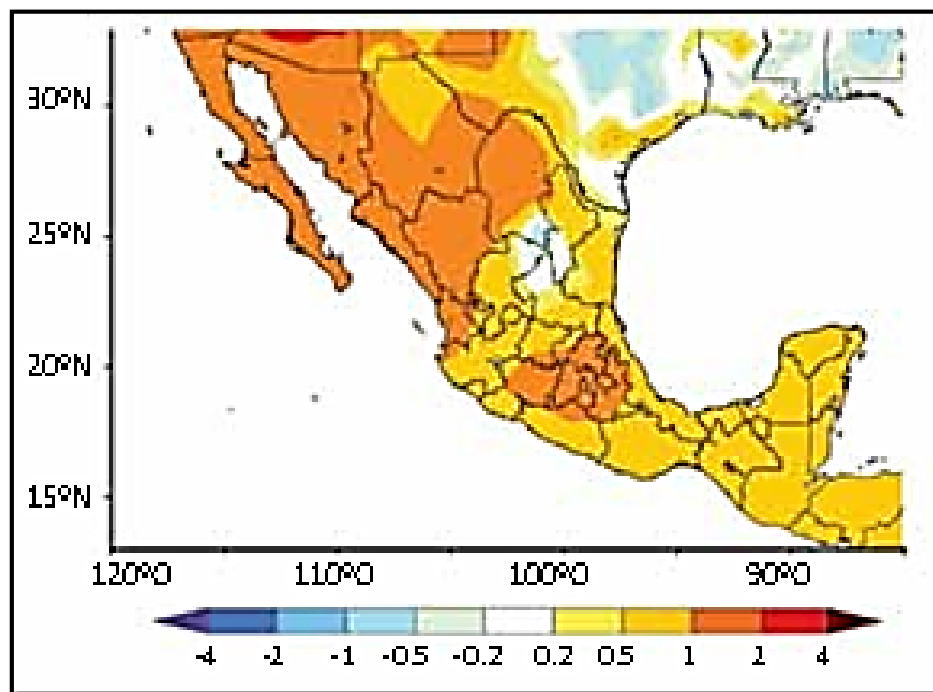
México es un país naturalmente vulnerable a los cambios en el clima: por su ubicación geográfica, en la zona intertropical del hemisferio norte, que coloca a dos terceras partes del país en zonas áridas o semiáridas, mientras que una tercera parte está sujeta a inundaciones; por su exposición a ciclones tropicales en sus tres márgenes costeros; por la diferencia en elevación de su territorio; y por la distribución de la precipitación y las diferencias en el escurrimiento, durante el curso del año y en espacio a lo largo y ancho del país (Herron, 2013).

De acuerdo con la “Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” (INE-SEMARNAT, 2012), las observaciones de los últimos 38 años, muestran que la temperatura media anual se ha elevado 0.6 °C, en promedio, para el territorio mexicano. La medida histórica del período se ubica en 20.9 °C y muestra que las observaciones están por arriba de la media histórica después de 1990; en los últimos 10 años la tendencia indica un calentamiento acelerado de 0.7°C.

De acuerdo con la Tercera Comunicación Nacional (INE-SEMARNAT, 2007), Cuarta (INE-SEMARNAT, 2009), y Quinta (INE-SEMARNAT, 2012), entre otros autores (Magaña et al, 2009), se espera que el clima de México será más cálido para el 2020, el 2050 y el 2080, principalmente en los Estados del Norte del país,

donde la temperatura puede aumentar entre 2 y 4 °C; mientras tanto, la temperatura de la superficie del mar en el Caribe, el Golfo de México y el Pacífico Mexicanos, podría aumentar entre 1 y 1.5 °C.

Las tendencias de la temperatura en los últimos cien años, de acuerdo con el análisis de temperatura de superficie, indican que en la mayor parte de México han ocurrido aumentos que varían de región en región (Figura 1). Las tendencias en la temperatura en gran parte del país podrían estar influenciadas por el efecto de la urbanización de las estaciones con las que se construye el campo de datos. Sin embargo, es probable que dicho efecto sólo sea perceptible en el Valle de México (Magaña et al, 2009).



**Figura 1. Tendencia de la temperatura media anual (°C/100 años) en México.**

Tomada de INE-SEMARNAT, 2012.

En las distintas regiones del país, el incremento de la temperatura causará mayor humedad en la atmósfera y menor humedad en el suelo, con lo cual se modificará el ciclo hidrológico: en el sur la evaporación aumentará, con lo que aumentará el número de tormentas severas e inundaciones; por otro lado, en el Norte y el Noroeste la humedad disminuirá, con lo que habrá más ondas de calor y se intensificarán los periodos de sequía. En el Norte, el Noroeste y el centro, habrá disminuciones importantes en la distribución de la lluvia (menos 15%), así como recorrimientos en su distribución temporal e intensidad (Salazar & Masera, 2010).

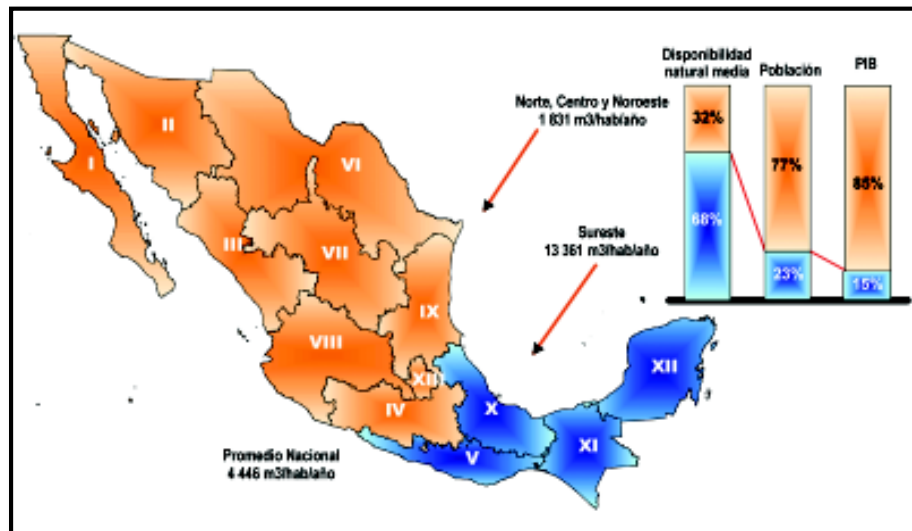
Los retos del agua en México, tienen su origen en factores como: una demanda que crece exponencialmente, derivada del crecimiento poblacional y del mayor desarrollo económico.

- La desigual distribución del agua en el tiempo y en el espacio.
- Una disponibilidad real menor, motivada por la contaminación del agua.
- Un uso ineficiente del agua en diferentes sectores.

Esto se complica aún más cuando, paradójicamente, la población, la actividad económica y las mayores tasas de crecimiento se concentran en el centro y el Norte del país, donde la disponibilidad del agua es menor. En contraste, en la zona sur del país, donde se presentan dos terceras partes de los escurrimientos, se asienta solo la cuarta parte de la población (Figura 2) (CONAGUA, 2006).

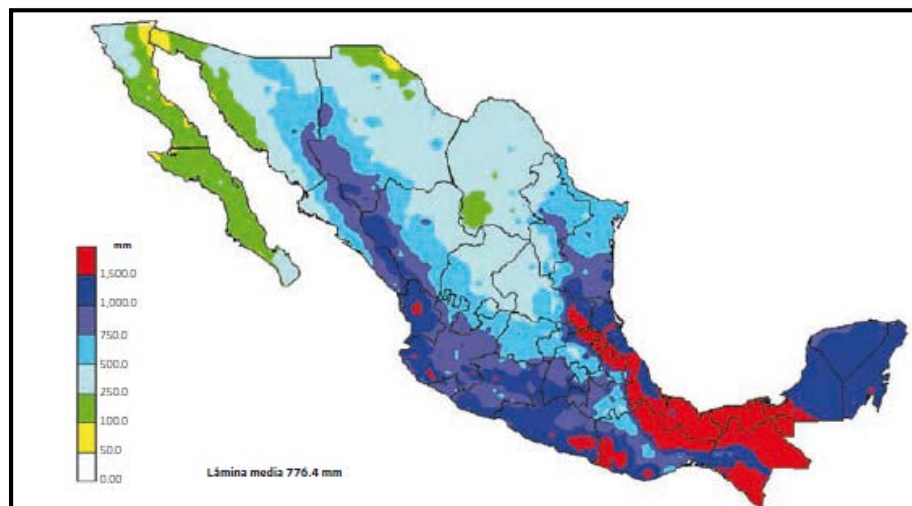
Cabe mencionar, que los valores de precipitación responden a los problemas de distribución del agua en el país, esto se hace notar debido a que en la región sur y al sureste del país se registran valores mayores a los 1500 mm anuales; mientras

que en el centro del país se registran valores entre 500 y 1500 mm anuales y para el noreste, de 250 mm anuales (Figura 3) (INE-SEMARNAT, 2009).



**Figura 2. Contraste entre el desarrollo y la disponibilidad del agua.**

Tomada de CONAGUA, 2006.



**Figura 3. Distribución de la precipitación anual en México, del 1941 a 2008.**

Tomada de INE-SEMARNAT, 2009.

#### 1.2.2.2.1. Vulnerabilidad.

Como país en desarrollo, México tiende a ser más vulnerable al cambio climático que muchos países desarrollados. Los efectos del cambio climático se están haciendo sentir de distintas maneras en cada región del país, dependiendo de la latitud, la geografía y el nivel socioeconómico. México es un país multicultural y diverso, tanto en regiones naturales como en los distintos niveles de desarrollo de la población. Esta diversidad lo hace altamente vulnerable ante el aumento de temperaturas y ante la alteración de los ciclos hidrológicos, así como a la incidencia de sequías e inundaciones severas.

Se han hecho estudios de los impactos sociales y económicos debidos a desastres como las inundaciones y las sequías, en los Estados que se consideran los más vulnerables, como Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán, seguidos de Chiapas, Oaxaca y Chihuahua. Se sabe que, de manera directa, se ven amenazadas: la integridad de las zonas costeras, las playas, las pesquerías, los arrecifes y manglares; la riqueza en biodiversidad (hasta el 40%); el suministro de servicios de agua, especialmente en el centro del país y en las zonas desérticas y semi-desérticas; la productividad del sector agropecuario (especialmente el de siembra de temporal); la producción petrolera; el suministro regional de energía (cuya demanda es creciente); la economía del sector turístico (Salazar & Masera, 2010).

En México no hay estudios, en el nivel de país, en materia de detección de cambio climático; si bien se ha detectado un incremento consistente de temperatura



en los últimos treinta años, el análisis de tendencias no es suficiente para discernir una señal antropogénica en el clima de una variación natural de muy baja frecuencia. Por ello, en México es necesario trabajar en materia de adaptación al cambio climático, dada la alta vulnerabilidad de diversos sectores socioeconómicos a extremos en el clima, principalmente en el sector agua (Magaña & Neri, 2005).

La Tabla 1 muestra los eventos extremos desde el año 2000 que se reportan al WMO/OMM sobre la situación del clima mundial y los estados del tiempo que se reportan. La sequía de 2009 y fuertes lluvias en julio del 2010 se destacan como ejemplos de eventos extremos de precipitación experimentados en México.

Tabla 1. Eventos extremos de precipitación en México.

Año	Mes	Evento	Detalles	Fuente
2003	Ago-Oct	Inundación	México fue impactado por una serie de huracanes y tormentas tropicales durante los meses de Agosto, Septiembre y Octubre, las cuales trajeron lluvias intensas, provocando inundaciones y deslaves.	WMO (2004)
2004	Abr	Inundación	Inundación severa sobre el Río Escondido. En el mes de Abril, una tormenta trajo lluvias intensas al suroeste de Estados Unidos en la frontera con México, causando la peor inundación en la región.	WMO (2005)
2005	Oct	Inundación	El Huracán Stan provocó inundaciones y deslaves en gran parte de México, provocando la muerte de miles de personas.	WMO (2006)
2006	Sept	Inundación	El Huracán Lane alcanzó vientos de 204 km/hr, causando inundaciones y deslaves.	WMO (2007)
2007	Nov	Inundación	Lluvias intensas causaron las peores inundaciones, y los peores desastres naturales de la historia de México. Destruyendo casas de millones de personas afectando seriamente la industria del país.	WMO (2008)
2009	-	Sequía	Condiciones de sequía severa.	WMO (2010)
2010	Ene-Feb	Inundación	Enero fue el tercer mes más lluvioso de la historia, y febrero el más húmedo. Lluvias intensas del 1 al 5 de febrero provocaron deslaves e inundaciones en varios estados, incluyendo la Ciudad de México.	BAMS (Davydova-Belitskaya & Romero-Cruz, 2011)
2010	Jul	Lluvioso	Julio fue el mes más lluvioso desde 1941, debido al fenómeno La Niña. Con un total de 244 mm contra el promedio de 140 mm.	WMO (2011) BAMS (Davydova-Belitskaya & Romero-Cruz, 2011)
2010	Oct	Seco	Octubre fue el más seco desde 1948, con solamente 6.7 mm de lluvia comparada contra el promedio de 27.5 mm.	WMO (2011) BAMS (Davydova-Belitskaya & Romero-Cruz, 2011)

Traducida de Chris & Slingo, 2011.

La Tabla 2 muestra los eventos extremos desde el año 2000 que se reportan al WMO/OMM sobre la situación del clima mundial y los estados del tiempo que se reportan. Huracán Alex, que tocó tierra en México en junio de 2010, se destaca como ejemplo de tormentas que afectan a México.

Tabla 2. Eventos extremos de tormentas en México.

Año	Mes	Evento	Detalles	Fuente
2000	Ago	Tormenta	Huracán Beryl	WMO (2001)
2000	Oct	Tormenta	Huracán Keith	WMO (2001)
2001	May	Tormenta	Huracán Adolfo	WMO (2002)
2001	Sept	Tormenta	Huracán Julieta	WMO (2002)
2002	Oct	Tormenta	Huracán Kenna - Tercer huracán más violento en México. Provoco pérdidas de 5 millones de dólares en Puerto Vallarta.	WMO (2003) BAMS (Lyon & Waple, 2003)
2005	Oct	Tormenta	Huracán Wilma - Categoría 4 en territorio Mexicano.	WMO (2006)
2008	Oct	Tormenta	Huracán Norberto - Vientos máximos de 220 km/hr. El más fuerte en la costa del Pacífico en el 2008; el primero de Octubre toco tierra en la Península de Baja California desde 1968.	WMO (2009)
2009	Oct	Tormenta	Huracán Rick - Vientos máximos de 285 km/hr. Es el segundo más intenso en la costa Norte del Pacífico, detrás de Linda en 1997.	WMO (2010)
2010	Jun	Tormenta	Huracán Alex - Vientos máximos de 175 km/hr, el más fuerte desde 1966. Este dejo inundaciones, afectando miles de personas y daños de millones de pesos.	WMO (2011) BAMS (Davydova-Belitskaya & Romero Cruz, 2011)

Traducida de Chris & Slingo, 2011.

#### 1.2.2.2.2. Datos de Observación

La necesidad mundial de los datos de observación, según el Manual del Sistema Mundial de Observación (OMM, 2010), hace referencia a los datos que necesitan los investigadores para llevar a cabo una descripción general de los fenómenos y procesos meteorológicos a gran escala, particularmente en esta

investigación se habla de la precipitación pluvial. Sin embargo, también existen necesidades regionales, tanto nacionales, las que como investigadores se lleva a una escala menor que la mundial, según sea el caso e interés buscado. Esto con el fin de tener mejores criterios al momento de describir dichos fenómenos.

Los datos de observación empleados en esta investigación son los registros de precipitación diaria de las estaciones pluviométricas. Cada organismo deberá establecer un diseño de red óptimo y lógico para dichas estaciones. Ya que éstas deben representar de manera satisfactoria las características climáticas de las diferentes regiones (ej. llanuras, zonas montañosas, mesetas, litorales, islas, etc.) (OMM, 2010). Por tanto, el organismo encargado de proporcionar esta información en el país (México), es el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.

#### 1.2.2.2.3. Adaptación.

Es inminente el cambio climático provocado por las actividades humanas. Por tanto, es imperioso establecer medidas de gestión de los riesgos climáticos actuales, puesto que estas medidas serán la base para gestionar los riesgos climáticos en el futuro. Los problemas del cambio climático abarcan todos los aspectos de la vida humana: las comodidades del hogar, la energía eléctrica, los alimentos diarios que se consumen, el paseo en automóvil, la industria, el campo, la flora y la fauna, entre muchos otros. No hay que perder de vista que uno de los recursos que más se está afectando con el cambio climático a causa de las actividades antropogénicas, comprende los recursos hídricos. Éstos son

indispensables para la producción de alimento en la agricultura, y más aún para la vida misma. Sin embargo, al estar alterando los ecosistemas, con nuevos proyectos, como carreteras, ciudades, se provocan al mismo tiempo alteraciones en los recursos hídricos, que afectan de un modo u otro. Estas afectaciones se dan por las sequías que se presentan o por las intensas tormentas. Bien se sabe que, sin agua, nada crece. Sin embargo, un exceso de agua, puede llevar a perderlo todo (OMM, 2012).

*“Nuestros descendientes heredarán el mundo que les leguen sus antepasados. Por eso, más que nunca, necesitamos guiarnos por los conocimientos científicos” (OMM, 2012).*

### 1.2.3. Índices de cambio climático.

Para que los resultados de los análisis probabilísticos sean teóricamente válidos, la serie de datos históricos debe satisfacer ciertos criterios estadísticos: aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad. La aleatoriedad significa que las fluctuaciones de la variable son originadas por causas naturales; la independencia se refiere a que ningún dato de la serie está influenciado por valores anteriores, o que él no influye en los posteriores; la homogeneidad implica que los datos proceden de una misma población y, finalmente, la estacionalidad significa que las propiedades estadísticas de los datos no cambian en el tiempo (Rodríguez & Marrero, 2011).

Los índices de puntos de observación individuales pueden ser posteriormente agregados en series regionales representativas del área geográfica

analizada; por tanto, los índices propuestos por el ETCCDI (El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático), proveen una base teórica común, de modo que pueden ser calculados consistentemente en diferentes regiones del planeta, para luego comparar o integrar los resultados de diversas regiones.

Los índices de cambio climático son útiles en la detección y el monitoreo de cambios en los extremos del clima (Karl et al. 1999; Peterson, 2005). Éstos se calculan a partir de los datos observados, medidos de temperatura y precipitación. La Tabla 3 muestra los índices propuestos por el ETCCDI.

Tabla 3. Resumen de los índices de cambio climático.

Índice	Descripción	Índice	Descripción
<b>CDD</b>	Días secos consecutivos	<b>RX5Day</b>	Precipitación máxima en 5 días
<b>CSDI</b>	Duración de los períodos fríos	<b>SDII</b>	Índice simple de intensidad diaria
<b>CWD</b>	Días húmedos consecutivos	<b>SU</b>	Días de verano
<b>DTR</b>	Rango diurno de temperatura	<b>TN10p</b>	Noches frías
<b>FD</b>	Días con hielo	<b>TN90p</b>	Noches cálidas
<b>GSL</b>	Estación de crecimiento	<b>TNn</b>	Temperatura mínima extrema
<b>ID</b>	Días con hielo	<b>TNx</b>	Temperatura mínima más alta
<b>PRCPTOT</b>	Precipitación total anual	<b>TR</b>	Noches tropicales
<b>R10mm</b>	Días con lluvia mayor a 10 mm	<b>TX10p</b>	Días frescos
<b>R20mm</b>	Días con lluvia mayor a 20 mm	<b>TX90p</b>	Días calurosos
<b>R95p</b>	Días muy húmedos	<b>TXn</b>	Temperatura máxima más baja
<b>R99p</b>	Días extremadamente húmedos	<b>TXx</b>	Temperatura máxima extrema
<b>Rnnmm</b>	Días con lluvia mayor a nn	<b>WSDI</b>	Duración de los períodos cálidos
<b>RX1Day</b>	Precipitación máxima en 1 día		

Tomada de Vázquez, 2010.

En el pasado se han investigado diferentes índices para evaluar el cambio climático que se presenta en el planeta, tal es el caso de Karl (1996), cuando presentó su artículo “Indices of Climate Change for the United States” (Índices de cambio climático para Estados Unidos), en el cual describió dos índices de cambio

climático, Índice de extremos climáticos (por sus siglas en inglés CEI) y el Índice de reacción de efecto invernadero (por sus siglas en inglés GCRI). Declaró que de acuerdo con estos índices, el clima en los Estados Unidos se ha vuelto más extremo en las últimas décadas.

El análisis de variaciones y tendencias de los fenómenos climáticos y de eventos extremos, tiene por objeto la proyección de los aspectos estadísticos de los fenómenos meteorológicos que pudiesen derivarse de los modelos climáticos que representen estados del clima futuros (Meehl, 2000). Esto se hace indispensable, de acuerdo con la exponencial pérdida económica, junto con esto, un aumento en las muertes debido a dichos fenómenos; han centrado la atención en la posibilidad de que estos eventos están aumentando en frecuencia. No obstante, en algunas partes del mundo el aumento de estos fenómenos es evidente, mientras que en otras parece existir un descenso en los mismos (Easterling et al, 2000). No fue sino hasta 2001 cuando el Grupo de Trabajo de Detección de Cambio Climático, conformado por Thomas C. Peterson, Christopher Folland, George Gruza, William Hogg, Abdallah Mokssit, Neil Plummer, y el Grupo de Trabajo de Índices e Indicadores de Extremos Climáticos, conformado por Thomas R. Karl, Neville Nicholls, Anver Ghazi, estudiaron los índices que lograran representar los fenómenos del clima y su posible comportamiento futuro, resumidos en la Tabla 3.

En 2008, Sillmann y Roackner evaluaron los índices de cambio climático propuestos por el ETCCDI, para proyecciones de cambio climático antropogénica, donde determinaron que tanto los índices de temperatura como los de precipitación, muestran un incremento significativo en todo el mundo. De tal forma que en las

regiones del mundo donde las condiciones son relativamente húmedas se agravaría dicho escenario; análogamente, los periodos de sequía aumentan, especialmente en las regiones que se caracterizan actualmente con este clima (Sillmann & Roackner, 2008).

Esteban (2012) evaluó los índices de cambio climático en Andorra, Pirineos. *“Las zonas de montaña son uno de los ambientes más frágiles del planeta”* (Díaz et al, 2003). Ahí determinó que las temperaturas reflejan el calentamiento sufrido en la zona, mientras que la precipitación resalta la falta de tendencias claras en el análisis para un período de 1935-2008; sin embargo, este hecho cambió para el período de 1950-2008, reflejando un claro descenso en la zona (Esteban, Prohom y Aguilar, 2012). Este hecho indica la falta de información necesaria para evaluar correctamente los índices de cambio climático; por tanto, se debe analizar cuidadosamente las series de datos e interpretarlas cuidadosamente. Esto permitirá evaluar las tendencias de los índices, permitiendo establecer en qué medida cambiará el medio circundante para adaptarnos a él, previendo lluvias de menor duración y mayor intensidad o viceversa.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN.**

En la actualidad, el mundo entero se ve inmerso en un cambio climático, que afecta a todos los sectores socioeconómicos de los países (p. ej. agricultura, ganadería, industria, población). No obstante, no están los países preparados para los cambios que se están generando. Un factor determinante a esta falta de preparación es la investigación de los procesos del cambio climático y las medidas necesarias de adaptación.

La crisis mundial del agua se ve reflejada en la tierra, quedando inscrita la población mundial y, a su vez, las formas de vida que en ella existen. Para algunos, la crisis del agua supone caminar a diario largas distancias para obtener agua potable suficiente, limpia o no, únicamente para salir adelante. Para otros, implica sufrir una desnutrición evitable o padecer enfermedades causadas por las sequías, las inundaciones o por un sistema de saneamiento inadecuado. Aunque, también hay quienes la viven como una falta de fondos, instituciones o conocimientos para resolver los problemas locales del uso y distribución del agua (ONU/WWAP, 2006).

Aunando a lo anterior, la auténtica tragedia de esta crisis es la consecuencia que implica sobre la vida cotidiana de las poblaciones pobres. Debido a que éstos sufren el peso de enfermedades relacionadas con el agua, viviendo en entornos degradados y a menudo peligrosos (ONU/WWAP, 2003).

Sin embargo, estas medidas de adaptación no serán suficientes si no se mejora la calidad de los datos observados, así como los métodos para realizar los



diseños apropiados para implantar dichas medidas de adaptación. Es por ello, que en esta investigación se pretende disponer de una metodología para la determinación del contraste del cambio climático presente y, con base en ello, acordar criterios útiles en la toma de decisiones al momento de diseñar obras hidráulicas.

#### **1.4. HIPÓTESIS.**

Si se evalúa el comportamiento del contraste de alturas de precipitaciones de acuerdo con los períodos de retorno ( $T_r$ ) y los índices de cambio climático, se podrá determinar el contraste entre estos parámetros, para tener un mejor criterio en la toma de decisiones en el diseño de obras hidráulicas.

#### **1.5. OBJETIVOS:**

##### **1.5.1. General:**

Asentar la metodología para la adaptación de los índices de cambio climático, en contraste con los períodos de retorno ( $T_r$ ), para obtener un mejor criterio en la toma de decisiones.

##### **1.5.2. Particulares:**

- a) Seleccionar las estaciones climatológicas con mayor número de años de datos registrados, con base en las normales climatológicas establecidas por la OMM.
- b) Revisar y actualizar las series de datos de precipitación.
- c) Obtener la homogeneidad y la calidad de las bases de datos de precipitación.

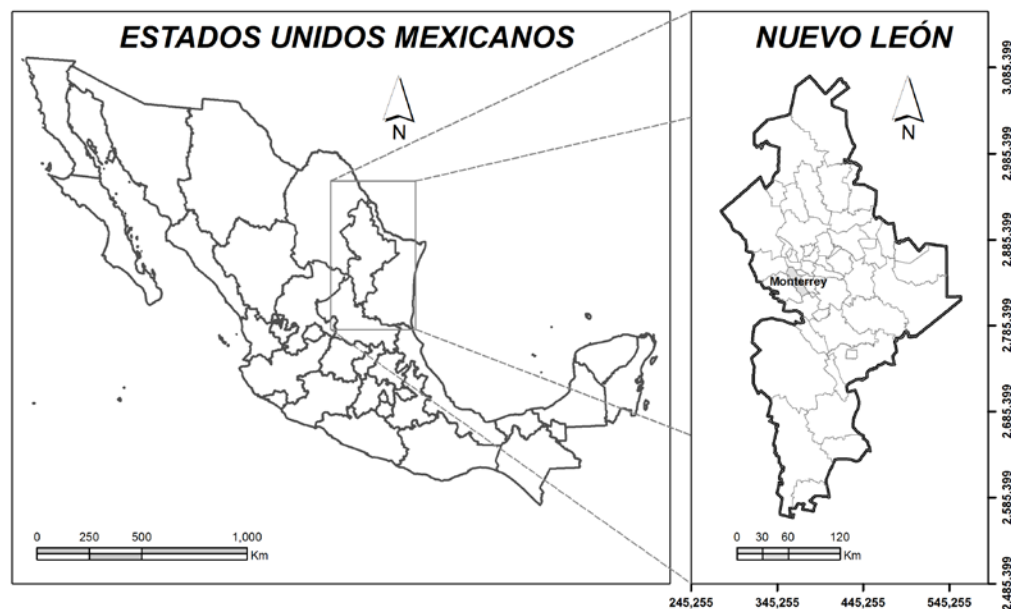
- d) Estimar las series de datos de precipitación con un método apropiado para los datos faltantes.
- e) Definir el valor de los cocientes lluvia-duración ( $r$ ) para cada estación climatológica.
- f) Adoptar la función de distribución de probabilidad que más se asemeje a las series de datos de precipitación, de acuerdo con las distribuciones de ajuste.
- g) Calcular los índices de cambio climático de precipitación.
- h) Calcular la probabilidad relacionada con un período de retorno ( $T_r$ ), de los índices de precipitación.
- i) Evaluar el comportamiento del contraste de precipitaciones, asociado a un período de retorno ( $T_r$ ) y los índices de cambio climático.

## CAPITULO 2

### EL MÉTODO.

#### 2.1. LA ZONA EN ESTUDIO.

El Estado de Nuevo León (Figura 4) se localiza en la parte nororiental del país, entre las coordenadas  $98^{\circ} 17'$  y  $101^{\circ} 07'$  de longitud Oeste, y las coordenadas  $23^{\circ} 6'$  y  $27^{\circ} 50'$  de latitud Norte. Limita al Norte con el Estado de Coahuila de Zaragoza, los Estados Unidos de América y el Estado de Tamaulipas. Hacia el Poniente limita con Coahuila de Zaragoza, San Luis Potosí y Zacatecas. Al Sur colinda con San Luis Potosí y Tamaulipas, con este último comparte todo su límite oriental. Nuevo León tiene una superficie de 64 081.94 km<sup>2</sup> (INEGI, 1986).

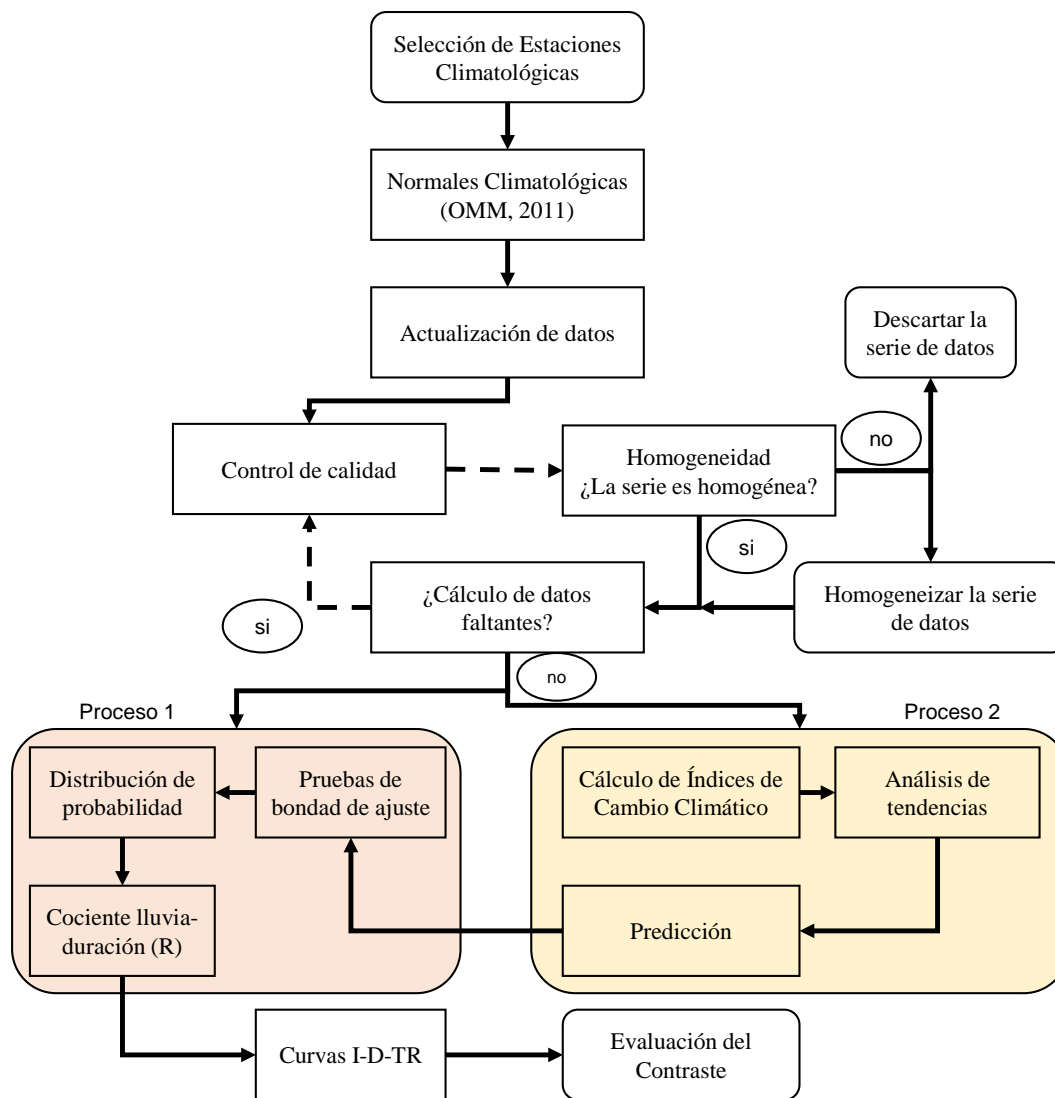


**Figura 4.** Mapa de la República Mexicana, donde se localiza el Estado de Nuevo León.

Elaboración propia.

Debido a las características propias de la región, se presentan grandes problemas, tales como prolongadas sequías y cortas pero intensas lluvias, que recientemente han afectado la zona. Uno de los hechos destacados que se atribuyen al cambio climático es el huracán “Alex”, en el 2010 (Chris & Slingo, 2011), que presentó lluvias prolongadas de baja intensidad: 38 horas de lluvia continua provocaron devastación en Monterrey y su área metropolitana. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) documentó que se descargaron entre 600 y 700 milímetros de precipitación, superando el promedio anual para la región, de 600 milímetros (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2013), debido a esto fue que se seleccionó Nuevo León como caso de estudio.

El procedimiento aquí expuesto se realizó de manera iterativa; es decir, en cada etapa se planteó la posibilidad de rehacer las etapas previas, con la finalidad de escrutar la información y obtener los resultados esperados. La Figura 5 muestra el diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo en esta investigación.



**Figura 5. Pasos para la evaluación del contraste.**

Elaboración propia.

## **2.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS.**

La obtención de los datos climatológicos del país se encuentra disponibles en la institución oficial encargada de administrarlos, el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA). Con el fin de promover el desarrollo de programas estatales de acción ante el cambio climático, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, antes INE), ha desarrollado una herramienta en línea para el uso de la base de datos climatológica nacional del sistema CLICOM en formato RClimdex por los miembros de la Red de Detección e Índices de Cambio Climático (REDICC) en México. Esta red de personas e instituciones fue recientemente creada como parte de un proyecto del INECC, financiado por la embajada Británica en México, con el apoyo de la Universidad Iberoamericana, campus Puebla.

### **2.2.1. Selección de las estaciones.**

Nuevo León cuenta con 172 estaciones climatológicas para la observación de las variaciones del clima; como lo son: la precipitación diaria, las temperaturas mínimas y máximas en un día dado, entre otras. La selección de datos sólo se enfocó en las precipitaciones diarias, que se utilizaron para el cálculo de los índices de cambio climático de precipitaciones.

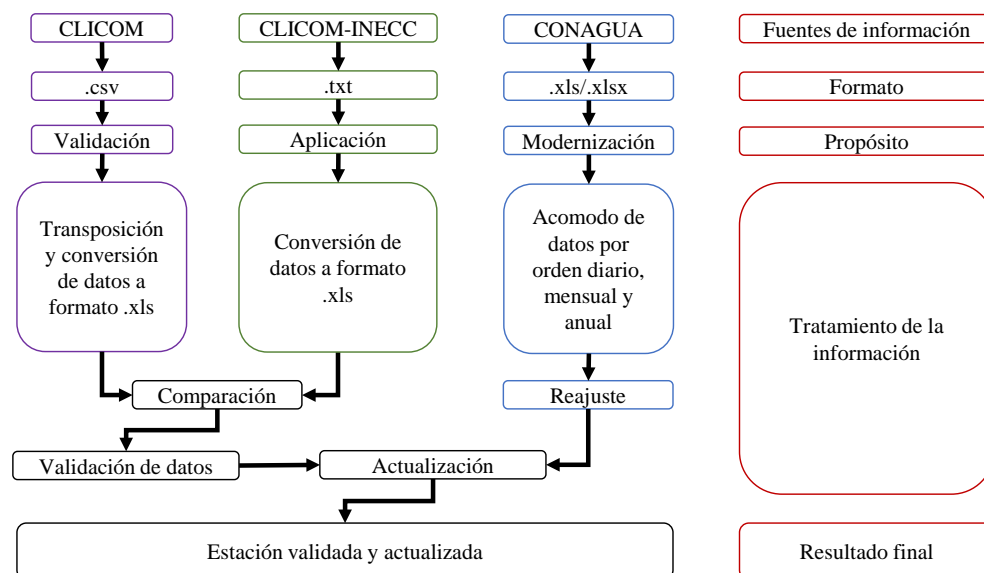
#### **2.2.1.1. Criterios de selección.**

Para la selección de las estaciones climatológicas analizadas se utilizaron dos criterios: el primero se consideró el período de validez para análisis de datos

climatológicos acordado por la OMM (Organización Meteorológica Mundial), que define las normales climatológicas estándar como “medidas de datos climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 años, a saber: desde el 1° de enero de 1901, hasta el 31 de diciembre de 1930; desde el 1° de enero de 1931, hasta el 31 de diciembre de 1960; etc.” (OMM, 2011). El período de normales estándar mundiales más reciente es de 1961-1990, y el próximo período está comprendido del 1° de enero de 1991 al 31 de diciembre de 2020; el segundo criterio empleado corresponde a la revisión de los datos climatológicos mediante las pruebas de calidad y homogeneidad explicadas más adelante.

### 2.2.2. Actualización de los datos.

La actualización de los datos climatológicos se realizó mediante la comparación de las bases de datos del CLICOM y CLICOM-INECC (formato RClimindex), más la información obtenida por la CONAGUA, actualizada al 2011–2012 (Figura 6).

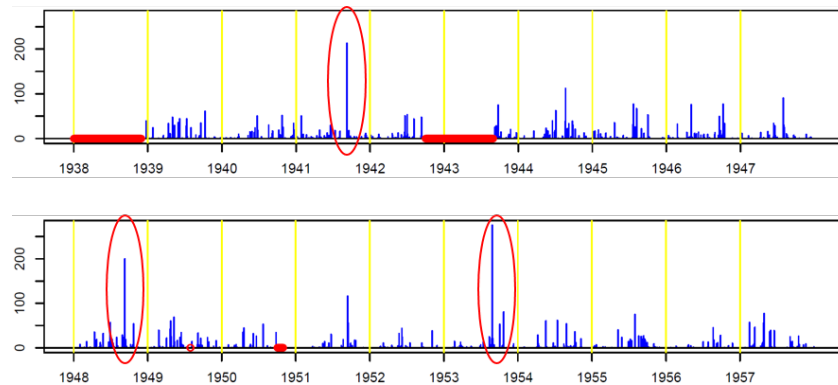


**Figura 6. Procedimiento de actualización de datos.**

Elaboración propia.

### 2.2.3. Control de calidad y homogeneidad de los datos.

Uno de los problemas del análisis de las series de datos observados es que aparezcan valores extraños que excedan o disminuyan exageradamente el nivel de variación habitual de la variable que se quiere analizar (Vázquez Aguirre, 2010). La Figura 7 muestra, encerrados en círculos, algunos de los valores de la serie que requieren verificación.

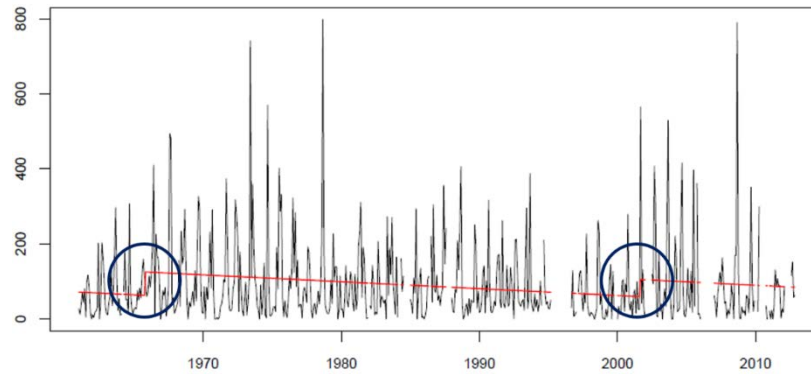


**Figura 7. Datos diarios de precipitación.**

Elaboración propia.

Estos valores poco comunes pueden ser errores tales como: de lectura, omisiones, inexactitud en la observación, basal o nula, mal estado del equipo de medición, etc. Todas estas heterogeneidades pueden afectar seriamente el análisis de los extremos. Los registros históricos son de gran importancia para la resolución de estas incertidumbres (OMM, 2009). En la Figura 8 se observa el salto y el cambio abrupto en la variabilidad de la precipitación. La significancia de los puntos de cambio puede indicar que la serie es no homogénea. Un análisis detallado determinará si estos eventos son ocasionados por errores en la serie de datos o si se trata de un evento extremo.





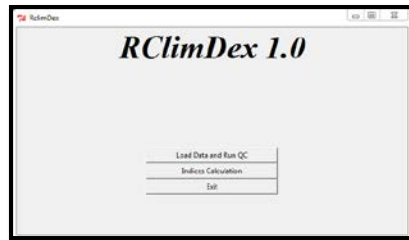
**Figura 8. Evaluación de la homogeneidad.**

Elaboración propia.

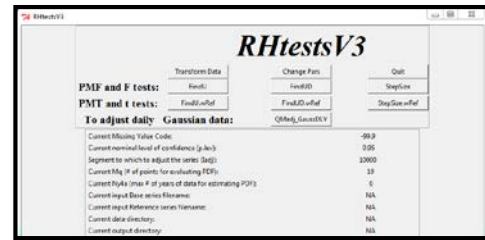
Para la evaluación del control de calidad y homogeneidad de las bases de datos se utilizó el programa “R”, mediante sus extensiones RClindex y RHtest (Figura 9 y Figura 10); RClindex se desarrolla y mantiene por Xuebin Zhang y Feng Yang, del Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. Es un programa basado en Microsoft Excel que proporciona un paquete computacional fácil de usar para el cálculo de los Índices de extremos climáticos, para monitorear y detectar el cambio climático (Zhang & Yang, 2004); RHtest fue desarrollado y mantenido por Wang Xiaolan y Feng Yang, de la División de Investigaciones Climáticas de Ciencias de la Atmósfera y la Dirección de la Tecnología del Departamento de Ciencia y Tecnología del Servicio Meteorológico de Canadá. Este programa se usa para detectar y ajustar la in-homogeneidad de múltiples cambios que pueden existir en una serie de datos (Wang & Feng, 2010).

“R” es un programa de uso libre; esto es, no tiene una licencia comercial. Su licencia de uso es la Licencia Publica General, y además de estar disponible sin costo en internet, incluye el código fuente con el que fue creado, con el fin de que

pueda modificarse o mejorarse. El programa, la documentación y todo lo referente al proyecto R se encuentra en el sitio <http://www.r-project.org>.



**Figura 9. Interfaz RCLimdex.**



**Figura 10. Interfaz RHtest.**

#### 2.2.4. Datos faltantes.

La sustitución de datos faltantes puede ponerse seriamente en tela de juicio, pues su utilidad para ciertos fines y, dado que podrían no conocerse las aplicaciones futuras en el momento de obtener o procesar los datos, la operación debería efectuarse con gran precaución y discreción (OMM, 2008).

“La elección del procedimiento para el manejo de datos incompletos resulta una tarea compleja, pues un mismo método, en determinadas situaciones, produce estimaciones precisas y en otras, no. Esto sugiere a los investigadores que, cuando manejen datos incompletos, valoren previamente el uso de más de una alternativa para tratarlos y realicen un análisis de sensibilidad que les permita una mejor elección del procedimiento a implementar” (Cañizares, Barroso & Alfonso, 2004).

Los mejores métodos para la determinación de datos faltantes, generalmente, dependen de las propiedades estadísticas de los datos. Actualmente existen diversos métodos para la evaluación de los datos faltantes, que deberán ser

evaluados y analizados cuidadosamente, según el propósito de aplicación. Los métodos utilizados son los siguientes: Redes Neuronales Artificiales (ANN, por sus siglas en inglés Artificial Neuronal Networks), Árboles de regresión (RT, por sus siglas en inglés Regression Trees), Interpolación Espacial (Spatial interpolation), Método de pesos (weighting methods) (Smith, 1993), métodos de interpolación no lineal determinística y estocástica (Teegavarapu, 2007; Zimmerman et al, 1999), métodos de regresión (Salas, 1993), Método del U.S. National Weather Service (Campos, 1998), Promedio aritmético simple, Método del cociente normal (Normal ratio method) (Paulhus and Kohler, 1952), Método tradicional UK, entre muchos otros. Para describir cada uno de estos métodos se necesitaría un capítulo entero; lo cual queda fuera del alcance de este trabajo. No obstante, el método seleccionado para esta investigación fue el método del U.S. National Weather Service (USNWS). Este procedimiento ha sido verificado tanto teórica como empíricamente y considera que el dato faltante en una cierta estación A, puede estimarse con base en los datos observados en las estaciones circundantes (Campos, 1998). El método de la USNWS, no es el método por excelencia para completar datos faltantes; no obstante, gracias a su simplicidad (Babak, 2014) es de gran utilidad para estos fines. Pizarro, Ramirez, y Flores, (2003) recomiendan que la selección del método más adecuado debe tener en consideración: “la distribución espacial y temporal de la precipitación, la densidad y la distribución de la red de medición, en función de la zona geográfica; la disponibilidad de datos, tanto cantidad como calidad, y la ejecución práctica del método”.

Este método consistió en ponderar los valores observados en una cantidad  $W$ , igual al recíproco del cuadrado de la distancia ( $D$ ) entre cada estación vecina y

la estación A (Campos, 1998). La precipitación buscada  $P_x$  se determinó mediante la Ecuación (1).

$$P_x = \frac{\sum (P_i * W_i)}{\sum W_i} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$P_x$  = Precipitación buscada para la fecha faltante, en mm.

$P_i$  = Precipitación observada para la fecha de la faltante, en las estaciones auxiliares vecinas (pueden ser como mínimo 2), en mm.

$W_i = 1/D_i^2$ , siendo  $D_i$  la distancia entre cada estación vecina y la estación incompleta, en km.

#### 2.2.4.1. Densidad de las estaciones.

El cálculo de la densidad de las estaciones tiene por objeto señalar una orientación de carácter general, cuando se carece de directrices específicas. A continuación se recomiendan ciertos valores de densidad mínima, que dependen de los tipos de estaciones a utilizar (p. ej.: precipitación, evaporación, flujo o caudal de un río, sedimentos, calidad del agua, etc.), así como de las zonas climatológicas y geográficas. Tales recomendaciones están basadas en un estudio efectuado en 1991, basado en las respuestas de los miembros, con respecto al proyecto de evaluación de redes básicas de la OMM, y aparecen indicadas en la Tabla 4 (OMM, 1992; 2008).

Tabla 4. Densidad de las estaciones (superficie, en km<sup>2</sup> por estación).

Unidad fisiográfica	Precipitación		Evaporación	Flujo fluvial
	No registradoras	Registradoras		
<b>Costa</b>	900	9 000	50 000	2 750
<b>Montaña</b>	250	2 500	50 000	1 000
<b>Planicie interior</b>	575	5 750	5 000	1 875
<b>Montes/ondulaciones</b>	575	5 750	50 000	1 875
<b>Islas pequeñas</b>	25	250	50 000	300
<b>Áreas urbanas</b>	-	10 a 20	-	-
<b>Polos/tierras áridas</b>	10 000	100 000	100 000	20 000

Tomada de OMM, 2008

## 2.2.4.2. Ejemplo de estimación de datos faltantes.

El registro de lluvia diaria de la estación climatológica “El Cuchillo”, en el Estado de Nuevo León, después de la actualización, cuenta con 2107 días sin registro, el equivalente al 8% aproximadamente. Se seleccionó el día 28 de Abril de 1986 como día al azar para la ejemplificación del cálculo (Tabla 5).

Tabla 5. Formato para cálculo de datos faltantes.

Registro de Años			Precipitación en estaciones vecinas									Estación a completar	Precipitación calculada	Estación más Datos Faltantes
Año	Mes	Día	19022	19041	19113	19043	19039	19042	19162	19169	19040			
1986	4	27	0.0	0.0	-99.9	0.0	-99.9	65.0	0.0	0.0	-99.9	-99.9	4.1	4.1
1986	4	28	42.5	45.5	-99.9	20.0	-99.9	0.8	3.0	0.0	-99.9	-99.9	33.6	33.6
1986	4	29	2.2	3.0	-99.9	20.5	-99.9	0.0	4.0	0.0	-99.9	-99.9	3.6	3.6

Paso 1. Se determinaron las estaciones climatológicas a utilizar por medio del radio de influencia obtenido a conveniencia, con base en la densidad de las estaciones acordada por la OMM. En este caso, para una zona de planicie interior/montes/ondulaciones, el radio de influencia es de 42.78 km aproximadamente (estableciendo la densidad de estación como un círculo).

Paso 2. Después de determinar las posibles estaciones, se verificaron las estaciones que tuvieran registro de precipitación el día en cuestión. Por tanto, se puede observar, en la Tabla 5, que las estaciones 19074, 19113, 19039 y 19040 no cuentan con registro el día estudiado, por lo que no se utilizaron.

Paso 3. Determinar  $D_i$  (Columna 2).

Paso 4. Determinar  $W_i$  (Columna 3).

Paso 5. Determinar  $P_i \cdot W_i$  (Columna 5 = Columna 4 x Columna 3).

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
Estaciones	$D_i$	$W_i$	$P_i$	$W_i \cdot P_i$
Vecinas	(Km)	$(1/D_i^2)$	(mm)	
19022 (O)	12.25	0.006664	42.5	0.2832
19041 (O)	24.62	0.001523	45.5	0.0693
19043 (O)	34.20	0.000855	20	0.0171
19042 (O)	37.71	0.000703	0.8	0.0005
19162 (O)	38.37	0.000679	3	0.0020
19169 (O)	39.05	0.000656	0	0.0000
Suma		0.01108	-	0.3721

Paso 6. Determinar  $P_x$ .

$$P_x = \frac{\sum 0.3721}{\sum 0.1108} = 33.6 \text{ mm}$$

### **2.3. PROCESO 1. DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ASOCIADA A UN PERÍODO DE RETORNO (TR).**

#### **2.3.1. Pruebas de bondad de ajuste.**

La mejor manera de efectuar una primera evaluación de la idoneidad de una distribución de probabilidad ajustada consiste en construir una gráfica de probabilidad de las observaciones (OMM, 2009). En hidrología se dispone de varias pruebas estadísticas rigurosas y útiles para determinar si es o no razonable concluir que un conjunto de observaciones dado ha sido obtenido de una familia de distribuciones en particular (Stedinger et al, 1993). El propósito de estas pruebas es deducir si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución observada y la distribución esperada. En otras palabras, tiene por objeto determinar si los datos se ajustan a una determinada distribución.

Las pruebas comúnmente utilizadas son las siguientes:

- $\chi^2$  (Chi-cuadrada).
- Kolmogorov-Smirnov.
- Cramér-Von Mises.
- Anderson-Darling.
- Pruebas de normalidad.
- Prueba de correlación de la gráfica de probabilidad.
  - Quantile-Quantile Plot (Q-Q Plot), etc.
- Momento de orden L.

Pará el análisis se utilizaron las pruebas de Chi-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y el método gráfico, que se mencionan a continuación.

Prueba de correlación de la gráfica de probabilidad.

La evaluación visual en papel probabilístico, es la prueba de bondad de ajuste más comúnmente usada para evaluar la distribución de probabilidad que mejor se ajusta (OMM, 1994). Consiste en graficar los datos observados en un papel probabilístico apropiado, y comparar con la función teórica de la distribución a analizar, y observar si ésta se ajusta o tiende a dicha función.

$X^2$  (Chi-cuadrada).

Esta es la prueba más antigua, Karl Pearson la introdujo en 1900. La prueba de chi-cuadrada es la prueba de bondad más utilizada en la ingeniería. Una propiedad atractiva de esta prueba es que puede aplicarse de igual manera para distribuciones discretas o continuas, mientras que las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling están restringidas a distribuciones continuas. Consiste en agrupar los datos en intervalos arbitrarios y los resultados dependen de cómo se agrupan dichos datos, especialmente para muestras pequeñas (OMM, 1994; Ricci, 2005).

Kolmogorov-Smirnov.

Esta prueba se usa para comprobar si la muestra de una población procede de una determinada distribución. Ésta fue descrita por Lawless (1982), y consiste en comparar la función de distribución muestral con la teórica y utiliza como estadística la máxima diferencia entre ambas, en valor absoluto (Ricci, 2005; Mermoz & García, 2008).



### 2.3.2. Distribuciones de probabilidad.

El análisis de frecuencia tiene por objeto analizar registros históricos de variables hidrológicas, con el fin de estimar las probabilidades de que vuelvan a ocurrir. Sin embargo, los fenómenos hidrológicos se caracterizan por una gran variabilidad, aleatoriedad e incertidumbre, por lo que debe tenerse presente que el análisis estadístico de datos hidrológicos no siempre arrojará una respuesta acertada. Aunque el análisis hidrológico suele estar basado en principios de hidrodinámica, termodinámica y estadística sólidamente establecida, el problema que reside en ellos no es otro que la aplicación de éstos en un entorno natural no homogéneo, del que se tienen muestras dispersas y un conocimiento únicamente parcial.

El estudio de estos fenómenos se centra no en lo que sucedió, sino en la probabilidad de que ocurra otro fenómeno extremo y destructivo en algún futuro. Para ello, en el planteamiento probabilístico, asumiendo independencia de los datos, podrá utilizarse el análisis de frecuencia, para describir la probabilidad de uno o varios sucesos, como son: precipitaciones tormentosas, caudales bajos y las crecidas máximas anuales (OMM, 2009).

Es por ello que las distribuciones de probabilidad se utilizan para diversos estudios hidrológicos, particularmente en estudios de caudales altos y bajos extremos, crecidas, volúmenes de embalse, cantidades de precipitación de lluvia y modelos de series temporales. En la Tabla 6 se muestran las funciones de distribución más comúnmente utilizadas en hidrología.

Tabla 6. Distribuciones de frecuencia habitualmente utilizadas.

Distribución	Función de densidad de probabilidad y/o función de distribución acumulativa	Intervalo	Momentos
Normal	$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right]$	$-\infty < x < \infty$	$\mu_X$ y $\sigma_X^2$ , $\gamma_X = 0$
Log-normal <sup>a</sup>	$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(x) - \mu_Y}{\sigma_Y} \right)^2 \right]$	$0 < x$	$\mu_X = \exp [\mu_Y + \sigma_Y^2/2]$ $\sigma_X^2 = \mu_X^2 \{ \exp [\sigma_Y^2] - 1 \}$ $\gamma_X = 3CV_X + CV_X^3$
Pearson de tipo III	$f_X(x) =  \beta  [\beta(x - \xi)]^{\alpha-1} \exp [-\beta(x - \xi)] / \Gamma(\alpha)$ (para $0 < \beta$ y $\xi = 0$ ; $\gamma_X = 2 (CV_X)$ )	$0 < \alpha$ para $0 < \beta$ : $\xi < x$ para $\beta < 0$ : $x < \xi$	$\mu_X = \xi + \alpha/\beta$ ; $\sigma_X^2 = \alpha/\beta^2$ $\gamma_X = 2/\sqrt{\alpha}$ $\gamma_X = -2/\sqrt{\alpha}$
Log-Pearson de tipo III	$f_X(x) =  \beta  \{ \beta[\ln(x) - \xi] \}^{\alpha-1} \exp \{ -\beta[\ln(x) - \xi] \} / x\Gamma(\alpha)$ para $\beta < 0$ , $0 < x < \exp(\xi)$ ; para $0 < \beta$ , $\exp(\xi) < x < \infty$	Véase Stedinger y otros (1993).	
Exponencial	$f_X(x) = \beta \exp \{ -\beta(x - \xi) \}$ $F_X(x) = 1 - \exp \{ -\beta(x - \xi) \}$	$\xi < x$ para $0 < \beta$	$\mu_X = \xi + 1/\beta$ ; $\sigma_X^2 = 1/\beta^2$ $\gamma_X = 2$
Gumbel	$f_X(x) = (1/\alpha) \exp \{ -(x-\xi)/\alpha - \exp [-(x-\xi)/\alpha] \}$ $F_X(x) = \exp \{ -\exp [-(x-\xi)/\alpha] \}$	$-\infty < x < \infty$	$\mu_X = \xi + 0,5772 \alpha$ $\sigma_X^2 = \pi^2 \alpha^2 / 6 = 1,645 \alpha^2$ $\gamma_X = 1,1396$
Valores extremos generalizados	$F_X(x) = \exp \{ -[1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa} \}$ cuando $0 < \kappa$ , $x < (\xi + \alpha/\kappa)$ ; $\kappa < 0$ , $(\xi + \alpha/\kappa) < x$	$(\sigma_X^2 \text{ existe para } -0,5 < \kappa)$	$\mu_X = \xi + (\alpha/\kappa) [1 - \Gamma(1+\kappa)]$ $\sigma_X^2 = (\alpha/\kappa)^2 \{ \Gamma(1+2\kappa) - [\Gamma(1+\kappa)]^2 \}$
Weibull	$f_X(x) = (k/\alpha) (x/\alpha)^{k-1} \exp \{ -(x/\alpha)^k \}$ $F_X(x) = 1 - \exp \{ -(x/\alpha)^k \}$	$0 < x$ ; $0 < k, \alpha$	$\mu_X = \alpha \Gamma(1 + 1/k)$ $\sigma_X^2 = \alpha^2 \{ \Gamma(1 + 2/k) - [\Gamma(1 + 1/k)]^2 \}$
Logística generalizada	$y = [1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa}$ para $\kappa \neq 0$ $f_X(x) = (1/\alpha) [y^{1/\kappa-1}/(1+y)]^2$ $F_X(x) = 1/[1+y]$	$y = \exp [-(x-\xi)/\alpha]$ para $\kappa = 0$ para $\kappa < 0$ , $\xi + \alpha/\kappa \leq x < \infty$ para $0 < \kappa$ , $-\infty < x \leq \xi + \alpha/\kappa$	$\mu_X = \xi + \alpha/[1/\kappa - \psi(\kappa)]$ Véase Ahmad y otros (1998) para $\sigma_X^2$ .
Pareto generalizada	$f_X(x) = (1/\alpha) [1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa-1}$ $F_X(x) = 1 - [1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa}$	para $\kappa < 0$ , $\xi \leq x < \infty$ para $0 < \kappa$ , $\xi \leq x \leq \xi + \alpha/\kappa$ ( $\gamma_X$ existe para $\kappa > -0,33$ )	$\mu_X = \xi + \alpha/(1+\kappa)$ $\sigma_X^2 = \alpha^2/[(1+\kappa)^2(1+2\kappa)]$ $\gamma_X = 2(1-\kappa)(1+2\kappa)^{1/2}/(1+3\kappa)$
Halphen			
Tipo A	$f_X(x) = \frac{1}{2m^\nu K_\nu(2\alpha)} x^{\nu-1} \exp \left[ -\alpha \left( \frac{x}{m} + \frac{m}{x} \right) \right]$	para $x > 0$ ; $m > 0$ ; $\alpha > 0$ ; $-\infty < \alpha < \infty^b$	
Tipo B	$f_X(x) = \frac{2}{m^{2\nu} \text{ef}_\nu(\alpha)} x^{2\nu-1} \exp \left[ -\left( \frac{x}{m} \right)^2 + \alpha \left( \frac{x}{m} \right) \right]$	para $x > 0$ ; $m > 0$ ; $\nu > 0$ ; $-\infty < \alpha < \infty^c$	Véase Marlat (1956).
Tipo B <sup>-1</sup>	$f_X(x) = \frac{2m^{2\nu}}{\text{ef}_\nu(\alpha)} x^{-2\nu-1} \exp \left[ -\left( \frac{m}{x} \right)^2 + \alpha \left( \frac{m}{x} \right) \right]$	para $x > 0$ ; $m > 0$ ; $\nu > 0$ ; $-\infty < \alpha < \infty^c$	

<sup>a</sup>Aquí  $Y = \ln(X)$ . También se usa habitualmente una distribución log-normal triparamétrica con  $Y = \ln(X - \xi)$ .<sup>b</sup> $K_\nu$  = función de Bessel modificada, segundo tipo.<sup>c</sup> $\text{ef}_\nu(\alpha)$  = función factorial exponencial.

### 2.3.3. Cociente lluvia-duración (r).

Debido a la escasez de registros de lluvia de corta duración, ha surgido la necesidad de utilizar las relaciones promedio entre lluvias encontradas en otros países. En cambio, las observaciones de lluvias máximas diarias tienen gran densidad y longitudes de registro aceptables, por lo cual, la lluvia con una duración de una hora y un período de retorno de dos años (o cualquier otro), se podrá evaluar con una relación a la de 24 horas con igual período de retorno, denominada cociente R (Campos & Gómez, 1990). Campos y Gómez obtuvieron 33 valores de cociente R para la república mexicana en su artículo publicado en 1990, entre los cuales se ubicaba el municipio de Monterrey, Nuevo León, con un valor de 0.3882. No obstante, en el XVI Congreso Nacional de Hidráulica, Araiza y Campos (2000) evaluaron nuevamente los valores de los cocientes R, pero esta vez para 341 sitios de la república mexicana, entre ellos nuevamente Monterrey, Nuevo León, con un valor de 0.3890. En este último artículo propone calcular dichos valores con base en las precipitaciones en una hora, para un período de retorno de 10, 25 y 50 años, calculando el promedio de éstas, y así determinando el valor del cociente R para una estación determinada.

Por otra parte, recientemente, en 2008 y 2010 se publicaron dos artículos más de Campos, en los que propone utilizar la información de isoyetas de intensidad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para estimar los cocientes lluvia-duración, ahí obtuvo para la estación de Monterrey, Nuevo León, un valor de R igual a 0.39. Por tanto, para esta investigación se utilizó el método propuesto por Campos, 2010.

#### 2.3.4. Curvas I-D-TR.

Las lluvias están definidas por tres variables: magnitud, duración y ocurrencia. La magnitud corresponde a la lluvia precipitada total ocurrida en la duración de la tormenta, la que se expresa en milímetros de precipitación. Cabe señalar que un milímetro de precipitación equivale a un litro por metro cuadrado. La ocurrencia o también denominada frecuencia se expresa en período de retorno de la lluvia o su intervalo de recurrencia, que es el tiempo promedio en años en el que el evento puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Por tanto las curvas I-D-TR (Curvas de Intensidad – Duración – Período de Retorno), forman una gráfica en la que se concentran las características de las tormentas de la zona o región, con respecto a las variables mencionadas (Campos & Gómez, 1990). Para la determinación de estas curvas se utilizó el método propuesto por Campos & Gómez (1990), donde describe las fórmulas de Bell (1969) para períodos de retorno menores que 10 años (Ec. 2); y la fórmula de Cheng-Lung Chen (1983) para períodos mayores que 10 años (Ec. 3).

Fórmula de F.C. Bell

$$P_t^T = (0.35 \ln T + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^2 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde; T es el período de retorno, en años; t es la duración, en minutos y  $P_{60}^2$  es la precipitación para un período de retorno de 2 años y duración de una hora.

## Fórmula de Cheng-Lung Chen

$$P_t^T = \frac{aP_{60}^{10} \log(10^{2-F} * T^{F-1})t}{60(t+b)^c} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde: T es el período de retorno, en años; t es la duración, en minutos,  $P_{60}^{10}$  es la precipitación para un período de retorno de 10 años y duración de una hora, F es el cociente de lluvia-frecuencia (Ec. 4); a, b y c son parámetros en función del cociente R y se determinan por medio de la Figura 11.

$$F = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

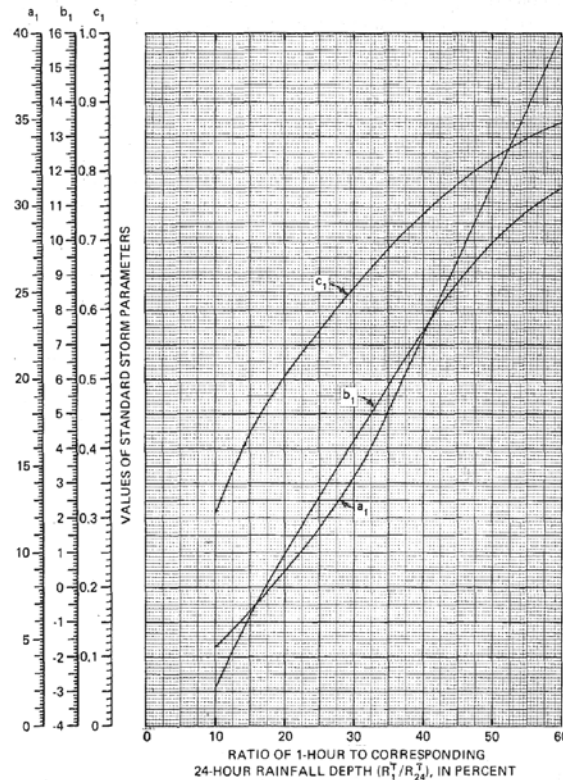


Figura 11. Valores de los parámetros a, b y c, en función de r.

Tomada de Cheng-Lung, 1983.

## 2.4. PROCESO 2. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR)

### 2.4.1. Índices de cambio climático.

Como se mencionó anteriormente, el cálculo de los índices se realizó mediante el complemento RClimdex. A continuación se definen los 3 índices de precipitación de interés para este estudio.

RX1day (Ec. 5). Precipitación máxima en un día. Sea  $RR_{ij}$  el total diario de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 1 día para el periodo  $j$  son:

$$Rx1day = \max(RR_{ij}) \quad \text{Ecuación (5)}$$

RX5day (Ec. 6). Precipitación máxima en cinco días. Sea  $RR_{kj}$  la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en  $k$ , periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 5-días para el periodo  $j$  son:

$$Rx5day = \max(RR_{kj}) \quad \text{Ecuación (6)}$$

PRCPTOT (Ec. 7). Precipitación total. Sea  $RR_{ij}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  periodo  $j$ . Si  $l$  representa el número de días en  $j$ , entonces:

$$PRCPTOT = \sum_{i=1}^l RR_{ij} \quad \text{Ecuación (7)}$$

#### 2.4.2. Predicción.

*“Cuando se buscan datos para estudiar el comportamiento de una variable y su relación con otras a lo largo del tiempo, estos datos se presentan frecuentemente en forma de series temporales”* (González, 2009a). Por tanto, una serie temporal se puede definir como: sucesiones de observaciones medidas y ordenadas cronológicamente y, espaciadas uniformemente en el tiempo (Villavicencio; González, 2009a, 2009b). La aplicación de las series de tiempo se pueden encontrar en cualquier campo de la ciencia, tales como: la Economía y el “Marketing”, datos para estudiar el comportamiento de una variable económica y su relación con otras a lo largo del tiempo; Demografía, crecimiento poblacional, tasa de natalidad y mortandad, etc.; Meteorología, precipitación pluvial, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, etc. (Villavicencio; González, 2009a, 2009b).

La herramienta utilizada para el análisis de series temporales, con frecuencia, es un **modelo** que permite reproducir el comportamiento de la variable en interés. Los modelos utilizados para estas series pueden ser: univariantes o multivariantes. Por tanto, los modelos univariantes consisten en el conjunto de observaciones de una sola variable. Tal es el caso de la precipitación pluvial (González, 2009b).

Ahora bien, no existe un único método para conseguir este modelo. Entre los métodos de series de tiempo se incluyen métodos de pronósticos y suavizamiento simples, métodos de correlación, métodos de Box Jenkins ARIMA, redes neuronales artificiales y fractales (Reyes, 2007).

El método seleccionado en esta investigación fue el modelo ARIMA. El modelo ARIMA puede utilizarse para modelar series de tiempo con o sin componentes de tendencia o estacionalidad y proporcionar pronósticos. El perfil de pronóstico depende del modelo de ajuste. Tiene la ventaja de ser más flexible que los métodos de suavizamiento para el ajuste de los datos; sin embargo, la identificación del modelo adecuado consume tiempo y no puede ser fácilmente automatizada. El modelo ARIMA se utiliza en diferentes ramas de la ciencia, por ejemplo: predicción de variables poblacionales, química de la precipitación (Nickerson & Madsen, 2005), calidad del agua en series de precipitación (Faruk, 2010), modelación del tráfico en redes inalámbricas (Yadav & Balakrishnan, 2014), producción de combustible fósil (Ediger, Akar & Ugurlu, 2006), entre muchos otros. Este método, permite una aplicación práctica con buena calidad de resultados, sin adentrarse en la complejidad de un modelo de redes neuronales o fractales. De acuerdo con Box y Jenkins, para ajustar un modelo ARIMA a una serie de tiempo proponen un método iterativo que incluye (Villavicencio; Reyes, 2007; González, 2009a, 2009b):



**Figura 12. Proceso de construcción de modelos ARIMA.**

Modificado de Villavicencio; Reyes, 2007; González, 2009a, 2009b.



*“El objetivo es obtener predicciones óptimas de las variables en estudio en algún momento futuro, basadas en un conjunto de información dado que en el caso del análisis de series temporales univariantes está formado por el pasado disponible de la serie temporal”* (González, 2009b). Este método se realizó con ayuda del procedimiento descrito en los ANEXOS, y con ayuda de los programas “R” y Minitab®.

## CAPITULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En la actualidad no se dispone de métodos capaces de comparar los índices de cambio climático propuestos por el IPCC y las precipitaciones asociadas a un período de retorno ( $T_r$ ). Tomando en cuenta esto, el objetivo principal de la investigación fue el análisis del contraste de estos dos parámetros, asentando la metodología apropiada para su evaluación (ver Figura 5). La idea del trabajo radicó en generar un criterio eficaz para la toma de decisiones al momento de diseñar las obras hidráulicas; ya que *“a la hora de tomar una decisión es muy importante contar con una visión de lo que va a suceder en el futuro...”* (González, 2009a).

#### 3.1. LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.

En la presente investigación se analizaron 172 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, ubicadas en el Estado de Nuevo León, para la medición de la precipitación, las temperaturas, la evaporación, entre otras variables climatológicas. Se utilizaron 65 estaciones distribuidas en la región, que fueron seleccionadas por el criterio de Normales Climatológicas (OMM, 2011), así como del resultado de la evaluación de actualización, revisión, control de calidad y homogeneidad de las series de datos. En la Tabla 7 se muestra la clave CLICOM, nombre, municipio, coordenadas geográficas, años de registro, años con datos y porcentaje de años añadidos de cada una de las estaciones.

Tabla 7. Estaciones climatológicas seleccionadas.

ID CLICOM	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Registro (años)	Años con datos		% Años <sup>4</sup>
						A <sup>1</sup>	C <sup>2</sup>	
19001	Las Adjuntas	Santiago	25°18'0"	100°8'27"	43	24.87	43.00	42.16
19002	Agua Blanca	Santa Catarina	25°32'39"	100°31'23"	56	40.18	54.74	25.99
19004	Apodaca <sup>3</sup>	Apodaca	25°47'37"	100°11'50"	48	35.78	51.99	33.77
19005	Aramberri I	Aramberri	24°6'11"	99°49'6"	42	38.09	38.53	1.04
19007	Cabezones <sup>3</sup>	Montemorelos	24°59'25"	99°44'30"	51	47.41	51.81	8.62
19008	Cadereyta	Cadereyta Jiménez	25°35'47"	99°58'51"	65	45.82	63.99	27.96
19009	Casillas	Rayones	25°1'24"	100°12'3"	56	46.22	56.00	17.46
19011	Cerro prieto	Linares	24°56'8"	99°23'20"	54	47.46	53.98	12.07
19015	El Cerrito	Santiago	25°30'5"	100°11'21"	55	44.24	54.83	19.26
19016	El Cuchillo	China	25°43'23"	99°15'20"	74	68.23	72.66	5.99
19018	El Pajonal	Santa Catarina	25°29'49"	100°23'56"	58	55.37	57.50	3.66
19020	El Potosí	Galeana	24°50'29"	100°19'30"	56	48.62	53.73	9.13
19024	Anáhuac	Anáhuac	27°14'28"	100°7'13"	78	73.89	77.55	4.69
19033	Laguna de Sánchez	Santiago	25°20'19"	100°16'44"	65	60.14	64.25	6.32
19035	Camacho	Linares	24°52'49"	99°34'55"	64	61.81	63.81	3.12
19039	Las Enramadas	Los Ramones	25°30'51"	99°31'3"	66	49.71	65.49	23.91
19041	Los Herreras	Los Herreras	25°53'20"	99°24'48"	69	47.52	68.82	30.88
19042	Los Ramones	Los Ramones	25°41'2"	99°37'42"	68	63.44	67.36	5.76
19045	Mina	Mina	26°0'26"	100°32'31"	57	54.20	55.69	2.62
19048	Montemorelos	Montemorelos	25°10'0"	99°49'18"	85	69.97	73.29	3.90
19049	Monterrey (OBS)	Monterrey	25°40'44"	100°16'38"	88	70.75	72.13	1.56
19050	San José de Raíces	Galeana	24°34'1"	100°14'17"	71	67.89	69.14	1.77
19055	Salinillas	Anáhuac	27°25'35"	100°22'55"	71	67.69	70.32	3.71
19056	San Juan	Cadereyta Jiménez	25°32'26"	99°50'44"	65	61.43	63.64	3.40
19057	San Rafael	Galeana	25°1'21"	100°32'14"	57	42.61	48.07	9.58
19058	Santa Catarina	Santa Catarina	25°39'29"	100°26'24"	66	50.15	63.14	19.68
19064	Vaquerías <sup>3</sup>	General Terán	25°6'46"	99°2'44"	51	23.65	44.14	40.18
19069	La Boca <sup>3</sup>	Santiago	25°25'35"	100°7'13"	43	37.42	51.67	33.13
19075	Doctor Arroyo II (DGE)	Doctor Arroyo	23°40'39"	100°10'49"	27	24.10	24.35	0.92
19085	Galeana (DGE)	Galeana	24°48'8"	100°4'34"	36	31.63	35.99	12.09
19091	Pabillo (DGE)	Galeana	24°35'39"	99°59'3"	37	34.32	36.57	6.07
19093	San Juanito de Reséndiz	Aramberri	24°16'49"	99°51'15"	37	29.81	35.26	14.72
19096	La Huasteca	Santa Catarina	25°38'29"	100°17'38"	37	34.67	36.50	4.94
19100	San Francisco la Carrera	Linares	24°41'8"	99°40'21"	36	18.97	35.55	46.06
19104	La Escondida	Aguaqueguas	26°15'22"	99°45'37"	34	29.34	34.00	13.68
19105	Doctor González	Doctor González	25°51'32"	99°56'16"	35	28.65	34.97	18.04
19106	La Pamona	Linares	24°59'36"	99°12'29"	35	20.39	32.99	36.01
19107	San Nicolás	Anáhuac	27°32'2"	99°58'33"	35	25.15	33.56	24.04
19109	Uña de Gato	Cerralvo	25°58'28"	99°41'45"	32	17.75	31.58	43.22
19110	El Álamo	Sabinas Hidalgo	26°29'31"	99°46'20"	31	20.37	30.58	32.94
19111	La Ascensión	Aramberri	24°19'20"	99°54'29"	33	16.45	32.24	47.85
19112	Benítez	Linares	24°43'1"	99°28'33"	33	18.93	32.56	41.29
19113	El Brasil	Doctor Coss	25°52'11"	98°59'4"	33	28.25	32.83	13.88
19114	El Cuervito	General Bravo	25°53'44"	98°48'56"	33	18.08	31.77	41.49
19117	Ejido Marín	Marín	25°51'39"	100°1'9"	34	32.45	33.98	4.52
19119	Espinazo	Mina	26°16'3"	100°36'59"	33	29.86	31.44	4.77
19121	Gatos Güeros	Linares	25°6'50"	99°21'22"	33	16.10	32.64	50.11
19124	Higueras (DGE)	Higueras	25°57'39"	100°0'29"	34	26.99	33.82	20.09
19125	Jaritas	Anáhuac	27°25'55"	99°48'40"	33	23.02	28.96	18.00
19126	La Laja	Hualahuises	24°54'2"	99°41'14"	33	24.72	32.65	24.04
19131	Puerto del Ébano	Sabinas Hidalgo	26°20'32"	100°2'16"	32	28.31	31.08	8.65
19134	Salinas Victoria	Salinas Victoria	25°57'5"	100°17'19"	34	31.45	34.00	7.50
19135	San Francisco de Berlanga	Galeana	24°21'18"	100°6'48"	32	29.51	31.99	7.76
19138	Santa Ana	Doctor Arroyo	24°5'52"	100°23'52"	33	28.08	29.67	4.83
19146	Congregación Calles	Montemorelos	25°12'57"	99°56'57"	32	25.91	31.56	17.65
19154	El Popote	Linares	24°54'45"	99°29'44"	32	16.17	30.98	46.26
19155	La Poza	Galeana	24°42'50"	100°0'30"	31	27.72	30.98	10.55
19158	Rancho de Gomas	Salinas Victoria	26°10'49"	100°27'24"	32	28.76	30.75	6.20
19160	San Ignacio de Texas	Galeana	24°18'55"	100°11'38"	33	27.89	32.23	13.17
19163	Las Brisas	General Terán	25°23'2"	99°32'50"	31	15.41	30.64	49.14
19166	Ejido Horcones	Lampazos de Naranjo	27°10'19"	100°24'38"	31	20.93	29.45	27.46
19170	El Hojase	Salinas Victoria	26°6'"	100°21'"	31	27.64	29.91	7.34
19172	Las Monitas	Cerralvo	26°7'54"	99°44'40"	31	15.46	30.00	46.88
19174	San Bartolo	Cadereyta Jiménez	25°32'"	100°0'"	31	25.18	30.29	16.46
19179	Cerrito del aire	Doctor Arroyo	23°35'"	100°13'"	35	17.29	24.03	19.27

1 Estaciones climatológicas actualizadas al 2011-2012, sin cálculo de datos faltantes.

2 Estaciones climatológicas actualizadas al 2011-2012, incorporando resultados de datos faltantes.

3 Estaciones que se agregaron años desde 1960 para completar el período marcado por las Normales Climatológicas.

4 Representa la cantidad de años que se completó de la estación en porcentaje.

Así mismo, la Tabla 7 muestra las estaciones utilizadas, así como el conjunto de datos analizados en esta investigación. Los años de registro implican la diferencia del año puesta en operación a la fecha o, en su defecto, hasta el año fin de operación de la estación. Se tienen 45.34 años en promedio de registro, para las estaciones climatológicas, con una desviación estándar de 16.18 años, una máxima de 88 años y una mínima de 27 años; no obstante, la realidad es que sólo se cuenta con 36.31 años en promedio con una desviación estándar de 16.60 años, una máxima de 73.89 años y una mínima de 15.4 años. Existe una gran cantidad de datos faltantes en la información climatológica, esto debido a diferentes razones como: el cambio de ubicación de la estación, la actuación de personal no capacitado, los daños en la estación, etc.; es por ello, que se procuró completar la información para obtener resultados fiables. El promedio de años aumentó considerablemente, a un 43.90, muy cercano al teórico, con una desviación estándar de 15.44 años, menor que la visualizada; una máxima y una mínima de 77.55 y 24.03 años respectivamente. Lo que implica series de datos relativamente extensas, resultando en un análisis estadístico y probabilístico representativo de las series y sus predicciones.

### **3.2. HOMOGENEIDAD Y CALIDAD DE LOS DATOS.**

La institución encargada de administrar las estaciones climatológicas para la República Mexicana, es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dependiente de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA); la que, en teoría, tiene actualizada la información climatológica hasta la fecha; no obstante, esto no sucede así. Debido a esto se revisó la información proporcionada por la institución responsable y se actualizó dicha información al 2011-2012, esto, con base en los registros proporcionados por dicha institución en octubre-noviembre de 2013.

Se realizó el control de calidad y homogeneidad en las series de datos, utilizando para ello la información diaria de cada estación; esto mediante la ayuda de programas especializados como lo es el “R” y sus complementos RClimdex y RHtest. La evaluación de los resultados de la revisión, actualización, homogeneidad y control de calidad desarrollado en esta investigación está relacionada con la comparación de las bases de datos del CLICOM, así como la información del CLICOM-INECC y su respectiva actualización con bases de datos de la CONAGUA. A continuación se representan los resultados de la estación 19004 “Apodaca”, ejemplificando las estaciones analizadas.

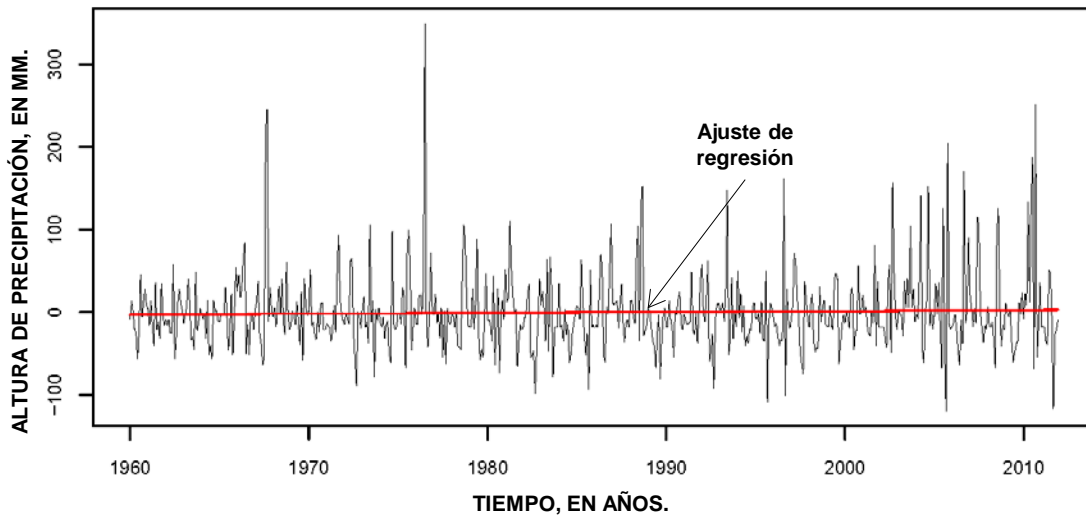
### 3.2.1. Estación climatológica 19004.

La estación con clave CLICOM 19004, con nombre “Apodaca”, se localiza en el municipio de Apodaca, N.L., que forma parte del área conurbada de la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM). Ésta se localiza al Noreste de la ZMM, a 1.5 km con respecto a la zona centro de dicho municipio. La estación cuenta con información histórica extensa, pues comenzó su operación en 1964 y actualmente se encuentra en servicio. En teoría, cuenta con 48 años de datos registrados; sin embargo, sólo cuenta con 35.78 años, lo que equivale al 74.54 %.

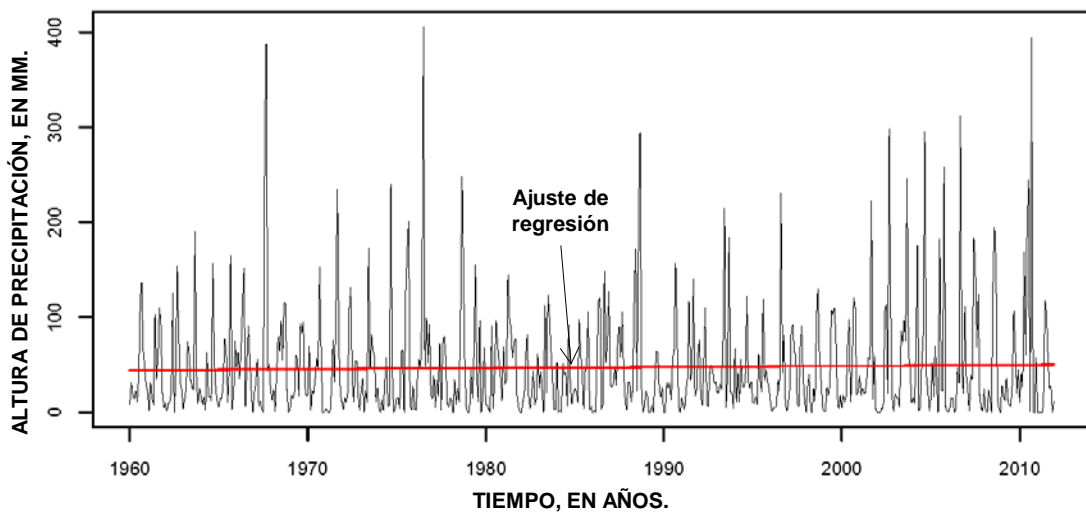
En esta estación se decidió, aparte de completar datos faltantes en años intermedios a su operación, se completaron datos desde 1960 a 1963 para completar la serie, de acuerdo con las normales climatológicas definidas con anterioridad. Tomando en cuenta esto, la estación aumentó a 51.99 años de datos registrados, lo que equivale al 100 % de datos completados, con un aumento de 8.33 % de la información registrada.

La Figura 13a y 13b muestran que la serie de datos tiene un comportamiento razonablemente homogéneo, lo que implica que los datos provienen y representan una misma población. El inciso “a” presenta los resultados con base irregular, es decir, toma los datos existentes de la estación, contemplando los valores -99.9 y genera el ajuste de regresión. El -99.9 indica que no existe el valor en esa fecha, lo que quiere decir que no hay dato registrado. El inciso “b” presenta el ajuste de regresión para la serie base; es decir, sólo contempla los días con datos registrados, lo que implica que no considera los valores -99.9, ya que, como se sabe, no existen

valores negativos en las precipitaciones. En estos dos incisos se observó que los datos comprenden un comportamiento visual y estadísticamente homogéneo; no obstante, en caso contrario, de haber visualizado inhomogeneidad, se deberá analizar cuidadosamente las series, para así verificar o corregir los valores causantes de dicha inhomogeneidad.



(a) Base irregular.



(b) Serie base.

**Figura 13. Homogeneidad con base irregular (a) y serie base (b).**

Las Figura 14 y 15 representan la calidad de datos de la estación, en la cual los picos que sobresalen, representan lluvias intensas que se presentaron en la zona; es decir, no se aprecian datos que puedan ejercer malinterpretación de los resultados en la serie de tiempo.

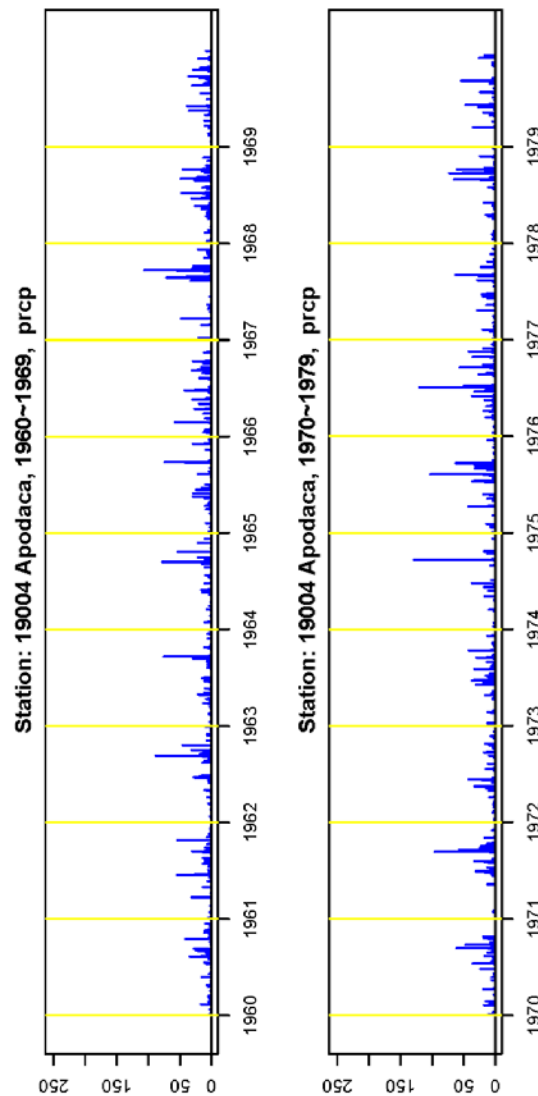


Figura 14. Control de calidad de la serie de datos.



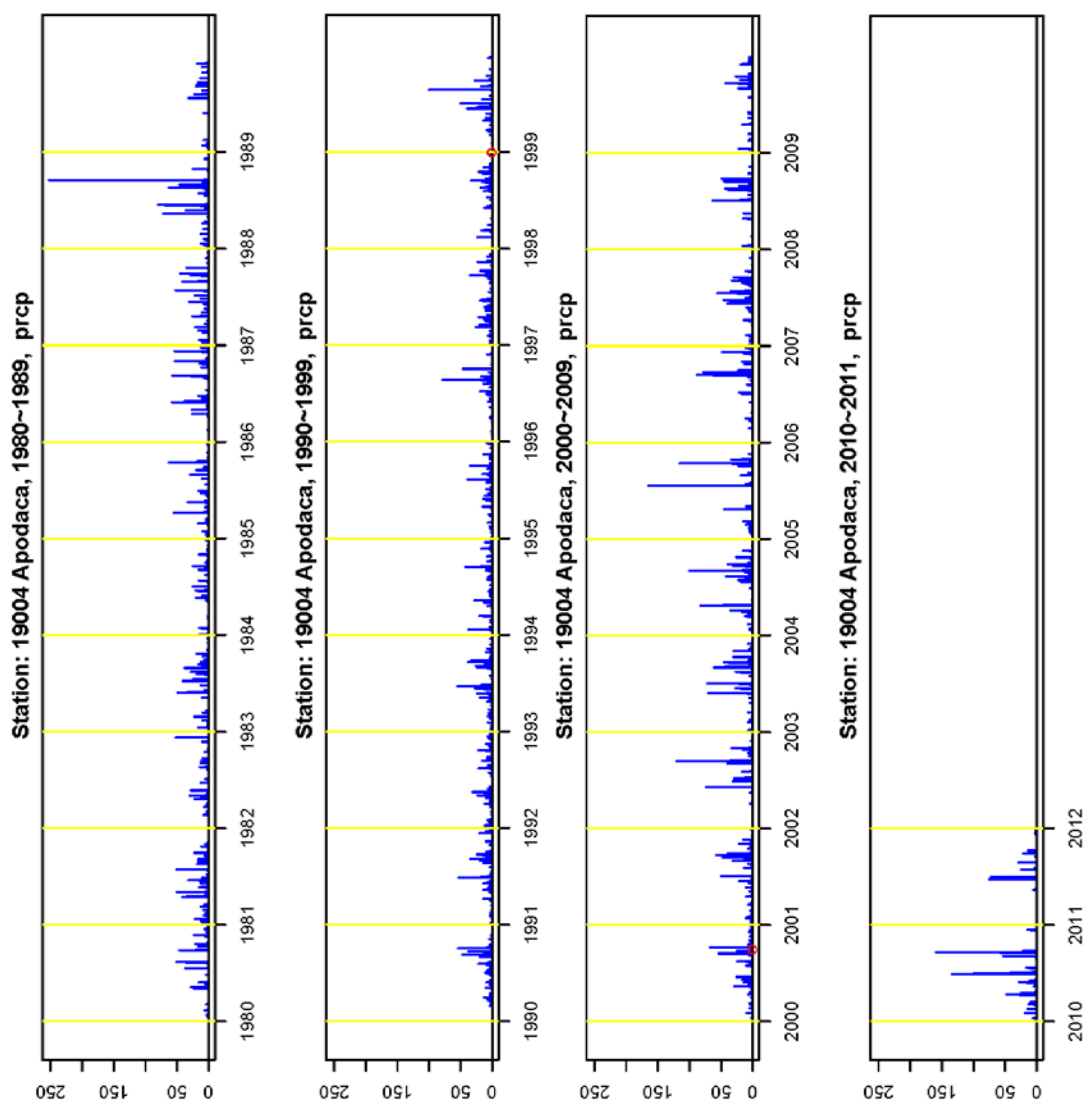


Figura 15. Control de calidad de la serie de datos (Continuación).

### 3.3. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS I-D-TR Y HP-D-TR.

El procedimiento de construcción de las curvas I-D-TR (Intensidad – Duración – Período de retorno) y HP-D-TR (Altura de precipitación – Duración – Período de retorno), permitió comparar las series de tiempo con información reciente, con la utilizada en el método propuesto por Campos (1990), contra los índices de cambio climático propuestos por el ETCCDI (Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático, por sus siglas en ingles). Para ello, se obtuvieron los valores del cociente lluvia-duración ( $r$ ) para cada estación, así como la función de distribución que mejor se ajusta y, por ende, que mejor representa cada serie, esto mediante el empleo de las pruebas de bondad, tales como, Chi-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y el método gráfico. El tratamiento a las bases de datos de los índices de cambio climático se realizó de igual manera; no obstante, se realizó la predicción a futuro, al año 2025-2026, y se analizó el comportamiento a futuro de las precipitaciones en esta región. Los índices de cambio climático analizados en esta investigación son: Rx1day, también denominada como **Precipitación máxima en un día**; Rx5day, conocida como **Precipitación máxima en 5 días**; y por último, PRCPTOT, nombrada **Precipitación Total**, que son de gran interés para vislumbrar el comportamiento de las precipitaciones. La Tabla 8 presenta la clave CLICOM, valor R, distribución de ajuste, modelo AR (Auto regresivo), Lag (retraso) y período para cada estación.

Tabla 8. Resultados del análisis de las estaciones climatológicas.

Clave CLICOM	Valor R	Distribución de ajuste							Modelo ARIMA								
		Pmáx 24 Hrs		Acum. 5 días	Prp TotAnual	Rx1day	Rx5day	PRCPTOT	Rx1day			Rx5day			PRCPTOT		
		A	C						AR	Lag	P	AR	Lag	P	AR	Lag	P
19001*	0.1716	LN	LP3	LP3	P3	P3	LP3	GMA	3	12	10	3	12	10	2	14	18
19002	0.5258	LN	LN	P3	LP3	LP3	LP3	LP3	3	14	-	2	20	-	2	22	-
19004	0.4404	P3	P3	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	2	18	-	2	20	-	4	10	-
19005	0.1088	P3	P3	LP3	P3	P3	EXP	VE1	3	14	9	2	14	19	4	14	8
19007	0.3318	P3	P3	LP3	LN	P3	LN	GMA	4	14	11	5	12	9	4	14	10
19008	0.3883	P3	VE1	GMA	P3	VE1	P3	P3	4	14	-	4	14	-	2	24	-
19009	0.3297	LN	LP3	P3	LN	EXP	P3	LN	3	13	-	3	15	-	2	14	25
19011	0.6572	LP3	LP3	LP3	LN	LP3	LP3	LP3	4	14	10	4	14	10	2	14	24
19015	0.2493	GMA	LP3	LP3	LP3	P3	P3	LN	2	20	-	2	14	19	2	14	25
19016	0.3392	P3	P3	LP3	P3	LP3	P3	N	4	14	15	4	14	-	5	14	11
19018	0.242	LN	LN	P3	P3	LN	LN	P3	4	14	-	2	17	23	4	9	13
19020	0.3129	LN	P3	LP3	LN	LN	LP3	VE1	3	14	16	3	12	16	1	14	50
19024	0.4282	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	3	12	23	5	14	13	4	16	17
19033	0.1978	LP3	LP3	LP3	P3	P3	LP3	LP3	3	20	-	3	14	20	4	14	13
19035	0.4529	LP3	LP3	P3	GMA	LP3	GMA	LP3	4	14	15	4	14	15	2	14	27
19039	0.4047	GMA	LN	LP3	LP3	LP3	LN	LP3	2	14	31	4	14	15	2	14	27
19041	0.3026	LP3	LP3	LP3	LP3	EXP	LP3	LP3	4	10	14	4	14	-	2	14	27
19042	0.3794	GMA	GMA	LP3	LP3	LP3	LN	LP3	4	8	14	5	10	12	4	14	12
19045	0.302	LP3	LP3	LP3	P3	LP3	LP3	VE1	2	14	26	4	14	12	4	12	-
19048	0.3605	VE1	VE1	VEL	P3	VE1	VE1	P3	2	14	35	2	14	29	3	12	20
19049	0.3896	LP3	LN	LN	LP3	P3	LN	LP3	4	14	-	2	14	30	2	14	25
19050	0.3497	LP3	LP3	LN	LN	LP3	LN	LP3	4	14	16	4	12	14	3	12	17
19055	0.4137	GMA	LP3	LP3	GMA	LP3	LP3	VE1	3	14	21	3	14	21	4	14	15
19056	0.395	LN	LP3	LP3	LP3	LP3	LN	P3	2	20	-	2	14	30	2	14	25
19057	0.3315	P3	LP3	GMA	LP3	P3	GMA	P3	4	14	11	4	14	11	4	14	8
19058*	0.4044	VE1	LN	LN	VE1	VE1	LN	LN	2	20	-	2	8	33	2	14	27
19064	0.566	LP3	LN	LP3	P3	VE1	LN	P3	2	14	22	2	12	21	4	14	8
19069	0.212	P3	LP3	LP3	LP3	LN	LN	LP3	4	10	-	2	14	25	2	12	21
19075*	0.0823	LN	LN	N	LP3	P3	P3	LP3	2	14	12	2	14	12	2	10	7
19085*	0.3062	P3	P3	LP3	P3	LN	LP3	N	4	14	6	2	8	15	3	14	7
19091	0.3193	LP3	LP3	LP3	LP3	P3	LN	LP3	4	14	7	2	14	18	2	14	15
19093	0.1993	LN	LN	LN	LP3	GMA	LN	LP3	2	14	17	2	14	17	2	8	12
19096	0.4313	LN	LP3	LP3	LP3	GMA	LP3	VE1	4	14	8	4	12	8	2	14	16
19100	0.3844	LP3	LP3	LP3	LP3	P3	P3	GMA	1	14	24	1	14	31	1	14	30
19104	0.2986	P3	P3	LP3	LP3	LN	GMA	GMA	1	14	19	1	14	24	1	14	28
19105	0.4936	P3	LN	LP3	LN	LN	P3	P3	2	14	16	2	14	16	1	14	31
19106	0.6268	LN	LN	LP3	LP3	GMA	LP3	LP3	4	14	6	2	14	12	1	14	24
19107	0.4000	LP3	LP3	P3	LP3	LP3	LP3	LP3	1	14	27	3	6	7	4	14	6
19109*	0.3602	LP3	LP3	LP3	LN	P3	LN	VE1	2	14	14	2	14	11	2	14	13
19110*	0.3541	GMA	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	1	12	29	1	14	22	1	14	23
19111	0.2204	LP3	LP3	P3	N	LP3	P3	N	2	14	13	2	14	15	2	14	11
19112	0.6081	LP3	LP3	LP3	LP3	GMA	GMA	LP3	4	14	7	1	14	25	1	14	23
19113	0.2806	LP3	LN	LP3	LP3	LN	LN	P3	2	14	15	2	14	15	2	14	-
19114	0.3054	GMA	LN	LN	LP3	LN	VE1	P3	2	14	13	2	14	13	1	14	20
19117	0.5033	LN	LN	LN	LP3	LP3	LP3	LP3	2	14	16	2	14	-	1	12	31
19119	0.2682	LP3	LP3	LP3	P3	LP3	VE1	N	1	14	30	1	14	30	1	14	25
19121	0.6559	LN	LP3	LP3	P3	LP3	LP3	LP3	1	14	21	1	14	21	1	14	23
19124	0.3157	LP3	LP3	GMA	LP3	LN	GMA	P3	1	14	26	2	14	13	1	14	26
19125	0.3208	LP3	P3	VE1	GMA	P3	VE1	N	4	4	6	2	10	16	1	8	18
19126	0.3629	LP3	LP3	P3	P3	LP3	GMA	LP3	4	14	7	1	14	31	1	14	17
19131	0.4208	LP3	LP3	P3	P3	LP3	P3	N	3	14	9	1	8	27	1	12	25
19134	0.2469	P3	EXP	LP3	LP3	LN	VE1	LP3	1	14	21	1	14	21	1	14	21
19135	0.1619	LP3	P3	P3	N	LP3	LN	N	4	14	7	2	14	-	2	14	15
19138	0.0813	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	LP3	1	14	22	1	14	22	3	14	6
19146	0.3284	LP3	LP3	LN	GMA	LP3	GMA	P3	4	14	7	1	14	28	1	14	22
19154	0.5542	VE1	GMA	VE1	LP3	GMA	GMA	GMA	1	6	14	1	6	24	1	14	22
19155	0.3329	VE1	LN	LN	P3	LN	LN	P3	3	14	9	3	14	7	3	14	8
19158	0.4035	P3	P3	P3	LN	P3	LP3	VE1	1	14	29	1	14	29	1	14	26
19160	0.0965	GMA	P3	LP3	LP3	LP3	N	LP3	2	14	16	4	14	7	1	14	20
19163	0.4941	P3	LP3	LP3	LP3	P3	LP3	LP3	1	14	21	1	14	22	1	14	21
19166	0.2736	LN	LN	LN	LP3	LN	GMA	LP3	1	8	24	1	8	24	1	14	23
19170	0.3171	LP3	LP3	P3	VE1	LP3	LN	P3	1	14	24	2	14	10	1	14	23
19172	0.2855	GMA	EXP	LP3	LP3	P3	LP3	P3	1	14	24	1	14	26	1	14	21
19174	0.3363	P3	P3	LN	LP3	LN	LN	LP3	1	12	26	2	10	11	1	14	25
19179	0.0938	LP3	LP3	LN	GMA	LP3	GMA	P3	1	6	26	1	14	23	1	8	10

Donde:

A	Actualizada	N	Distribución Normal
C	Completada	LN	Distribución Log-Normal
Acum. 5 días	Acumulada en 5 días	GMA	Distribución Gamma
PrpTotAnual	Precipitación Total Anual	EXP	Distribución Exponencial
Rx1day	Índices de cambio climático	P3	Distribución Pearson Tipo III
Rx5day		LP3	Distribución Log-Pearson Tipo III
PRCPTOT		VE1	Distribución Valores Extremos I (Gumbel)
AR	Modelo Auto regresivo	P	Período
Lag	Retraso	*	No se actualizó al 2011-2012 por falta de información

Los análisis de predicción permitieron verificar, validar, y calcular el modelo que mejor se ajusta a la serie de tiempo analizada. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 16, que muestra que el modelo AR2 es el que mejor se ajusta, con un 33 %, para representar las estaciones analizadas; siguiéndole el modelo AR1, con un 31 %; mientras que los modelos AR4, AR3 y AR5 sólo representan un 23 %, un 11 % y un 2 %, respectivamente, de la estaciones.

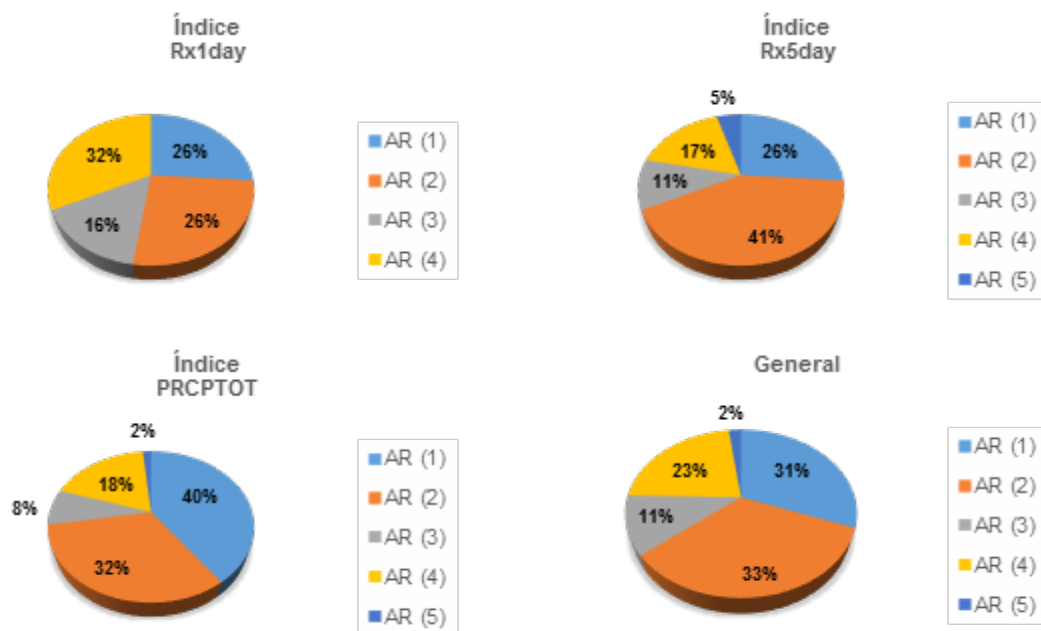


Figura 16. Modelo ARIMA aplicado para cada índice de cambio climático.

A continuación se presentan los resultados de la estación climatológica 19004 "Apodaca", ejemplificando las estaciones analizadas.

## 3.3.1. Estación climatológica 19004.

Con base en la Tabla 8, el ajuste para la estación actualizada y con cálculo de datos faltantes, la función que mejor compone la serie es la función de distribución Pearson Tipo III, no obstante, para los demás datos la función que mejor representa las series es Log-Pearson Tipo III. La Tabla 9 muestra los resultados de análisis de ajuste de las pruebas Chi-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov; de la Figura 17 a la Figura 22 se presenta el método gráfico. Para el caso del índice Rx1day, se determinó la distribución mediante el promedio de los valores del error cuadrático mínimo, error estándar de ajuste y la prueba Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 9. Resultados de las pruebas de bondad (ajuste).

Precipitación Máxima en 24 horas - Actualizada						Precipitación Máxima Acumulada en 5 días					
Función/Prueba	ECM	EEA	$\chi^2$	KS	Promedio	Función/Prueba	ECM	EEA	$\chi^2$	KS	Promedio
N	7	7	NaN	6	NaN	N	7	7	NaN	7	NaN
LN	6	6	NaN	2	NaN	LN	6	6	NaN	2	NaN
E	2	2	NaN	7	NaN	E	1	1	NaN	6	NaN
G	4	4	NaN	4	NaN	G	4	4	NaN	5	NaN
P3	1	1	1	3	1.5	P3	3	3	NaN	3	NaN
LP3	3	3	NaN	1	NaN	LP3	2	2	1	1	1.5
VE1	5	5	NaN	5	NaN	VE1	5	5	NaN	4	NaN
Precipitación Máxima en 24 horas - Completada						Precipitación Total Anual					
Función/Prueba	ECM	EEA	$\chi^2$	KS	Promedio	Función/Prueba	ECM	EEA	$\chi^2$	KS	Promedio
N	7	7	NaN	6	NaN	N	7	7	NaN	6	NaN
LN	6	6	NaN	2	NaN	LN	5	5	4	4	4.5
E	3	3	NaN	NaN	NaN	E	4	4	NaN	NaN	NaN
G	4	4	NaN	3	NaN	G	6	6	5	5	5.5
P3	2	2	1	5	2.5	P3	2	2	3	3	2.5
LP3	1	1	NaN	1	NaN	LP3	1	1	1	1	1
VE1	5	5	NaN	4	NaN	VE1	3	3	2	2	2.5
Rx1day						PRCPTOT					
Función/Prueba	ECM	EEA	$\chi^2$	KS	Promedio	Función/Prueba	ECM	EEA	$\chi^2$	KS	Promedio
N	7	7	NaN	NaN	NaN	N	7	7	NaN	6	NaN
LN	6	6	NaN	2	NaN	LN	5	5	3	4	4.25
E	3	3	NaN	5	NaN	E	4	4	NaN	NaN	NaN
G	4	4	NaN	3	NaN	G	6	6	5	5	5.5
P3	1	1	NaN	6	NaN	P3	2	3	4	3	3
LP3	2	2	NaN	1	NaN	LP3	1	1	1	1	1
VE1	5	5	NaN	4	NaN	VE1	3	2	2	2	2.25
Rx5day						Donde:				Prueba	
Función/Prueba	ECM	EEA	KS	Promedio		Función		Prueba			
N	7	7	NaN	NaN		N	Normal	$\chi^2$	Chi		
LN	6	6	NaN	3		LN	Log-Normal		Cuadrada		
E	1	1	NaN	6		E	Exponencial				
G	4	4	NaN	4		G	Gamma	KS	Kolmogorov		
P3	2	2	NaN	2		P3	Pearson Tipo III		Smirnov		
LP3	3	3	1	1	2	LP3	Log-Pearson Tipo III				
VE1	5	5	NaN	5	NaN	VE1	Valores Extremos I (Gumbel)				
						ECM/EEA	Error Cuadrático Mínimo/Estándar Ajuste				

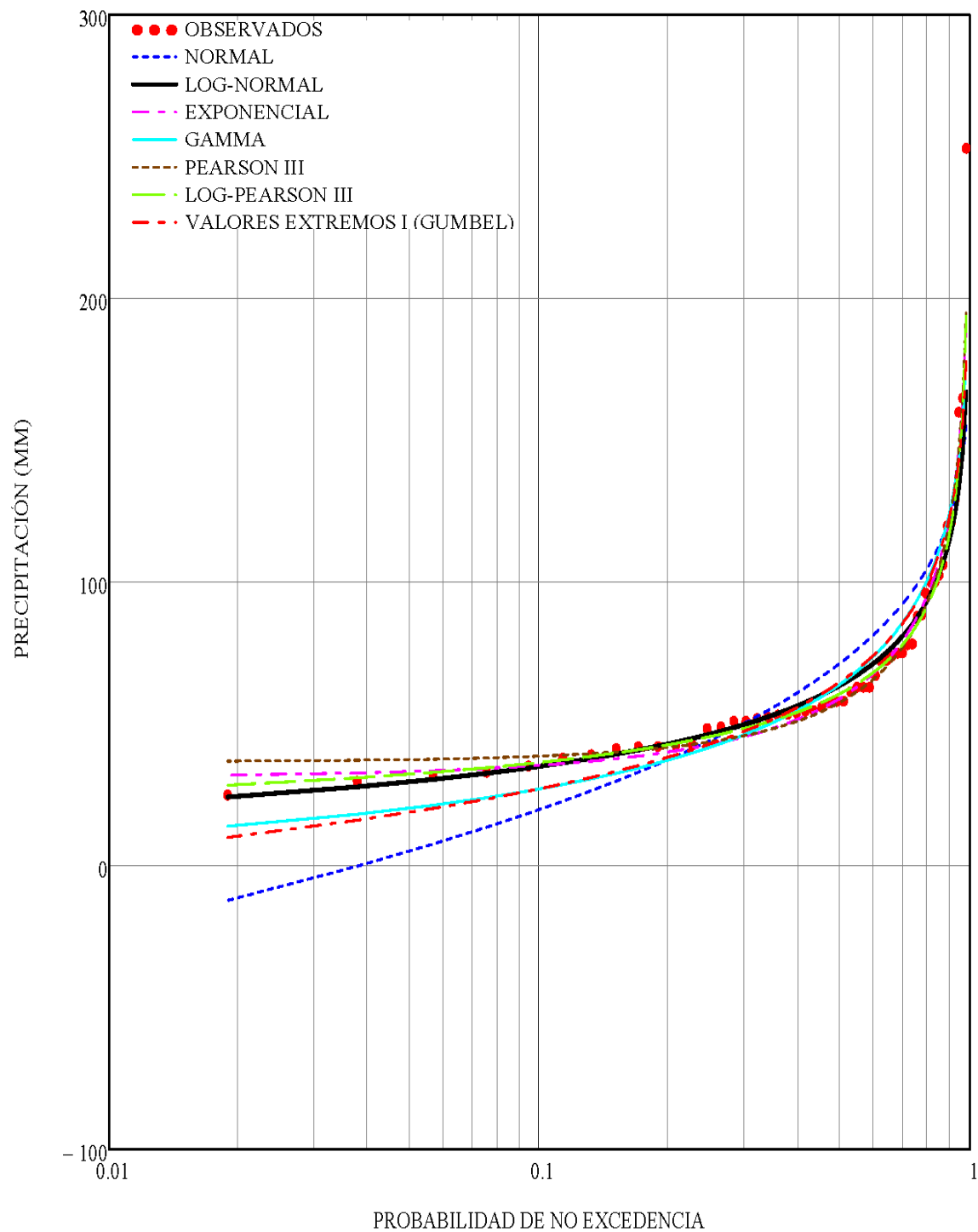


Figura 17. Precipitación máxima en 24 Horas - Completada (ajuste método gráfico).

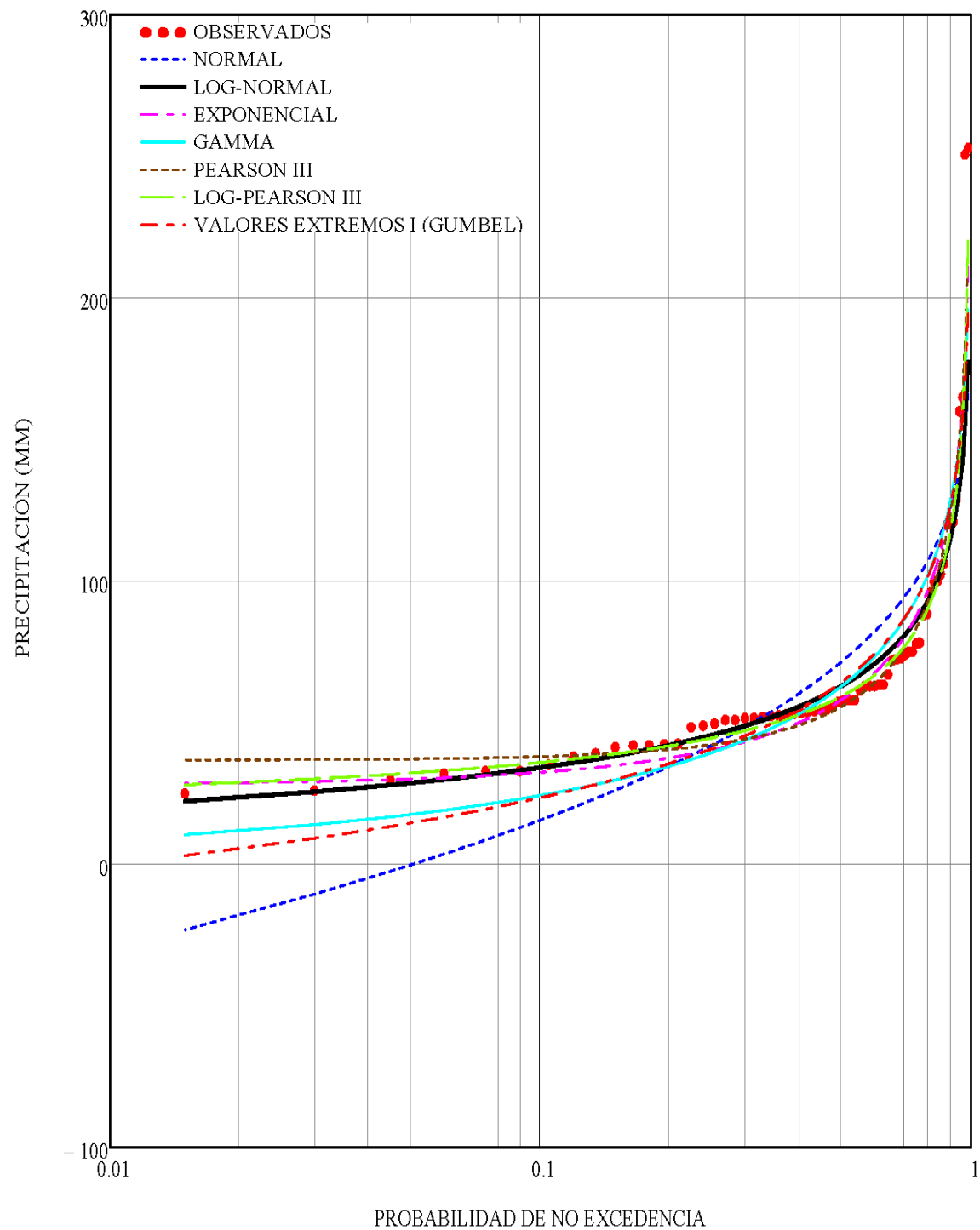
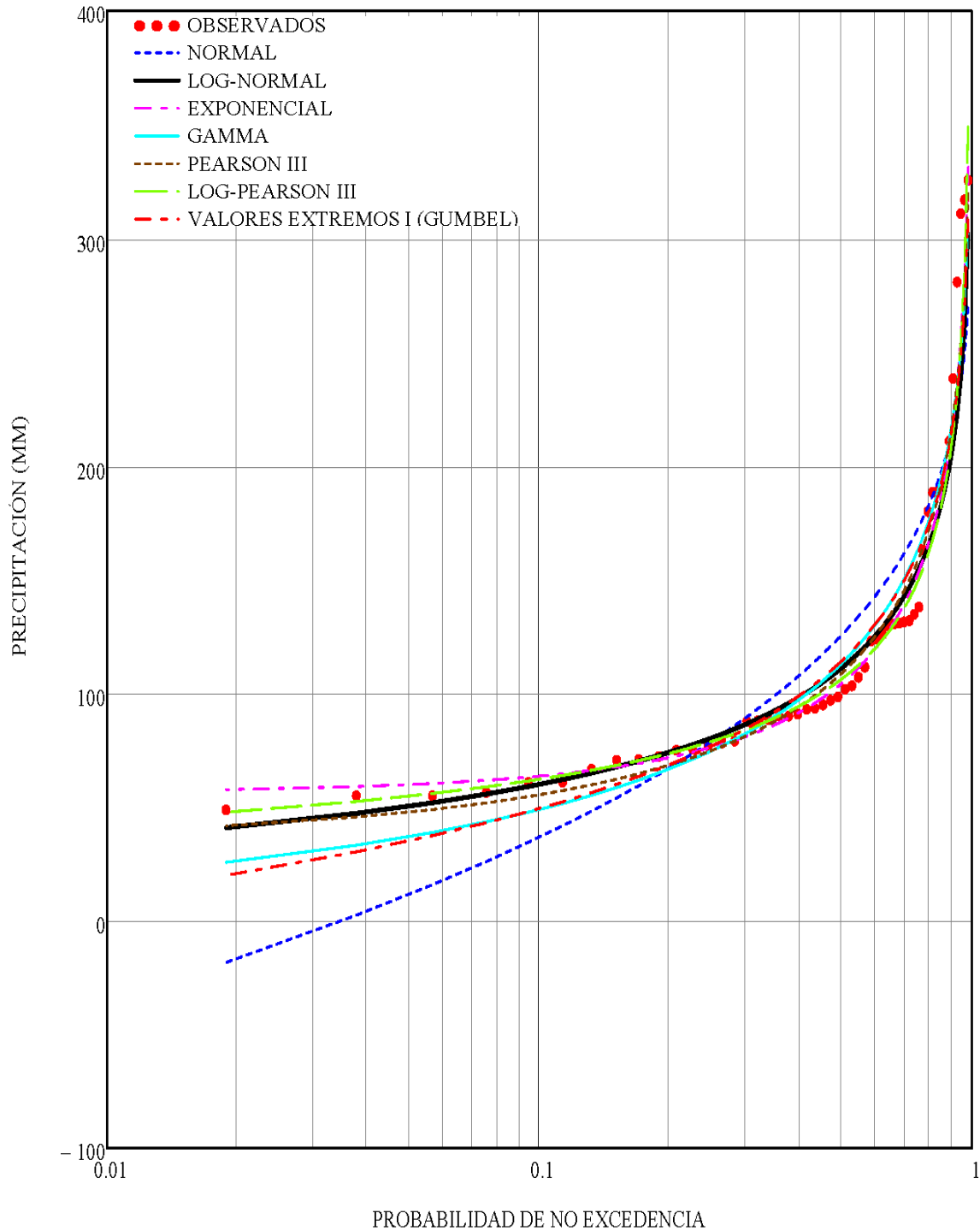
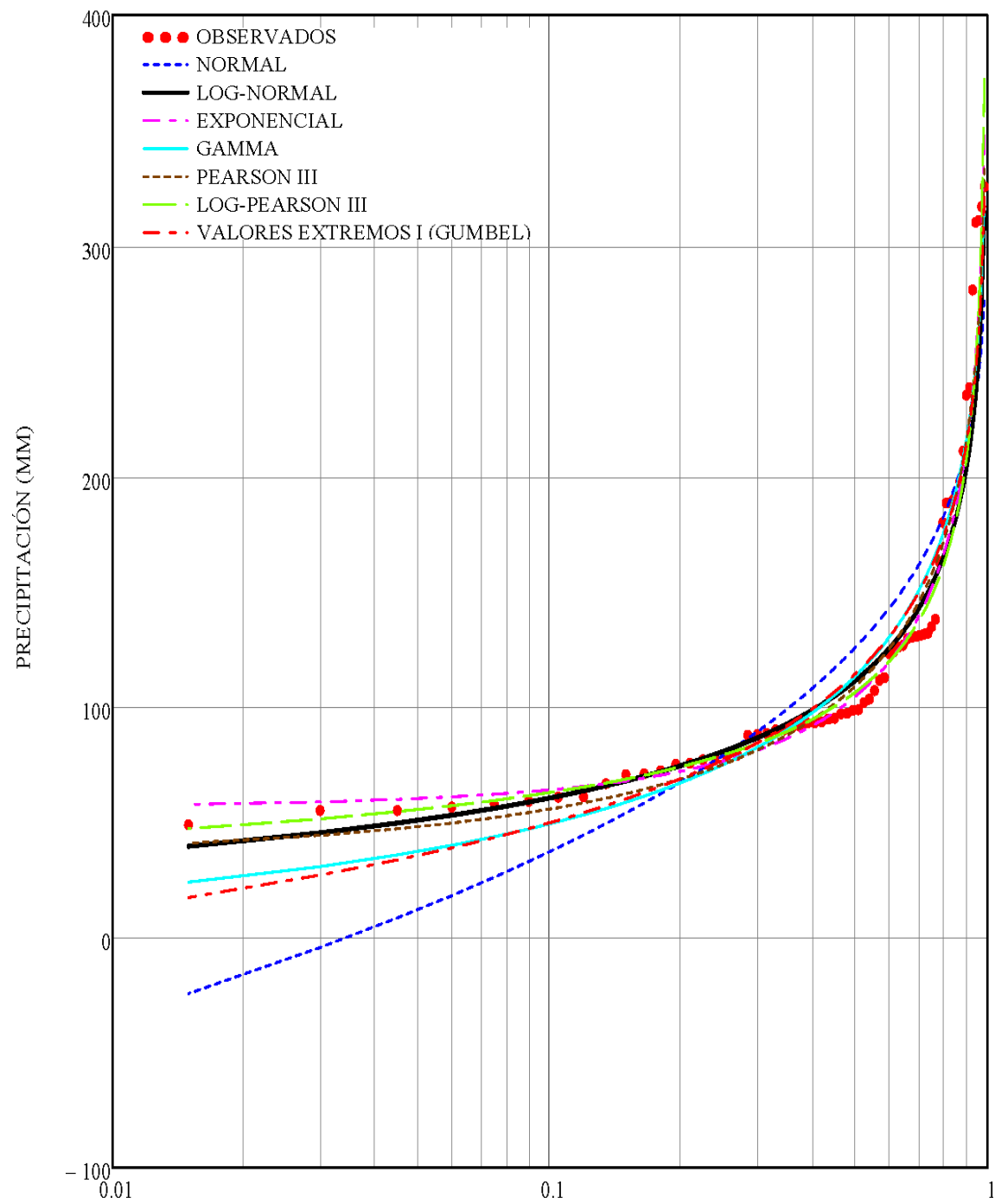
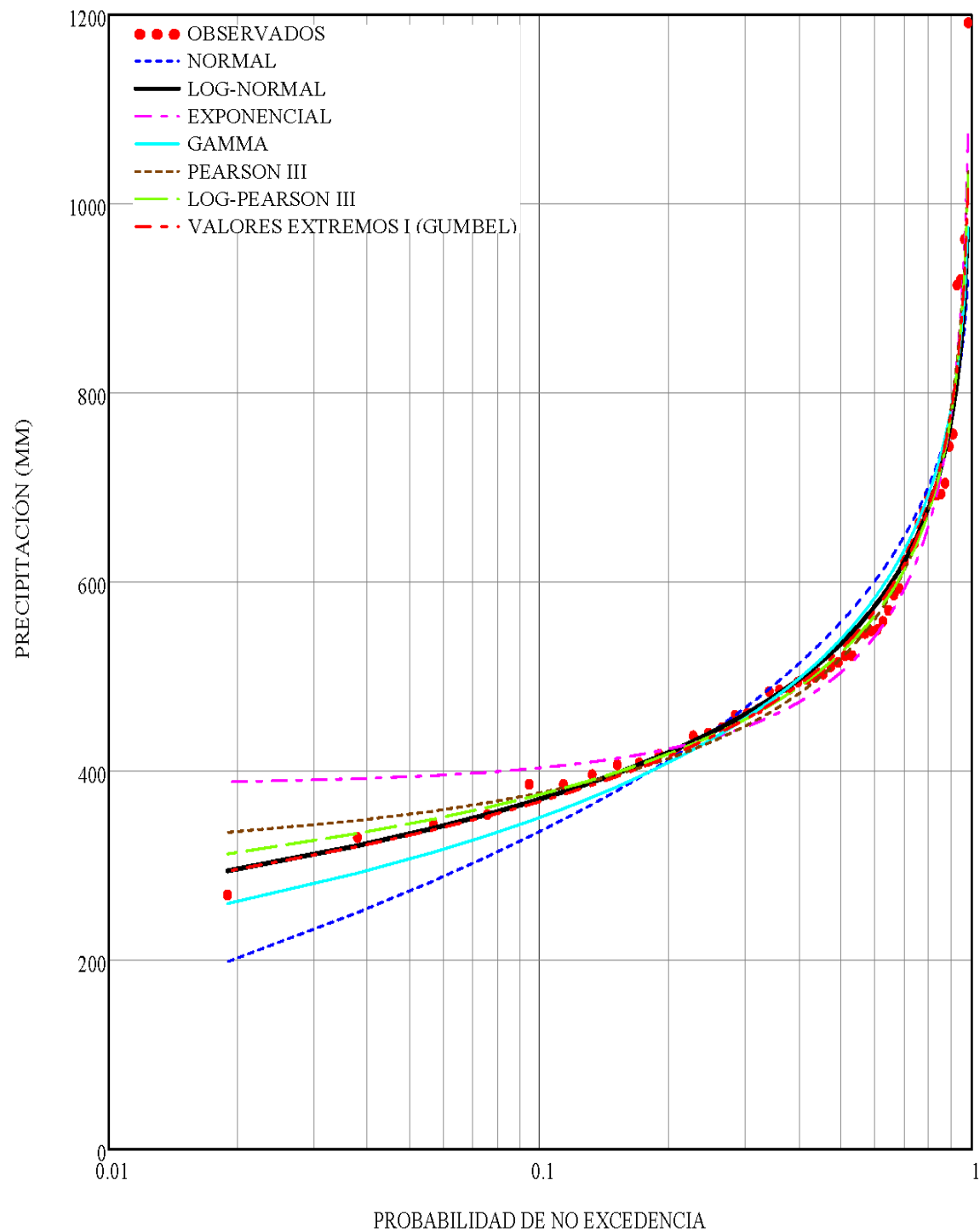


Figura 18. Rx1day (ajuste método gráfico).

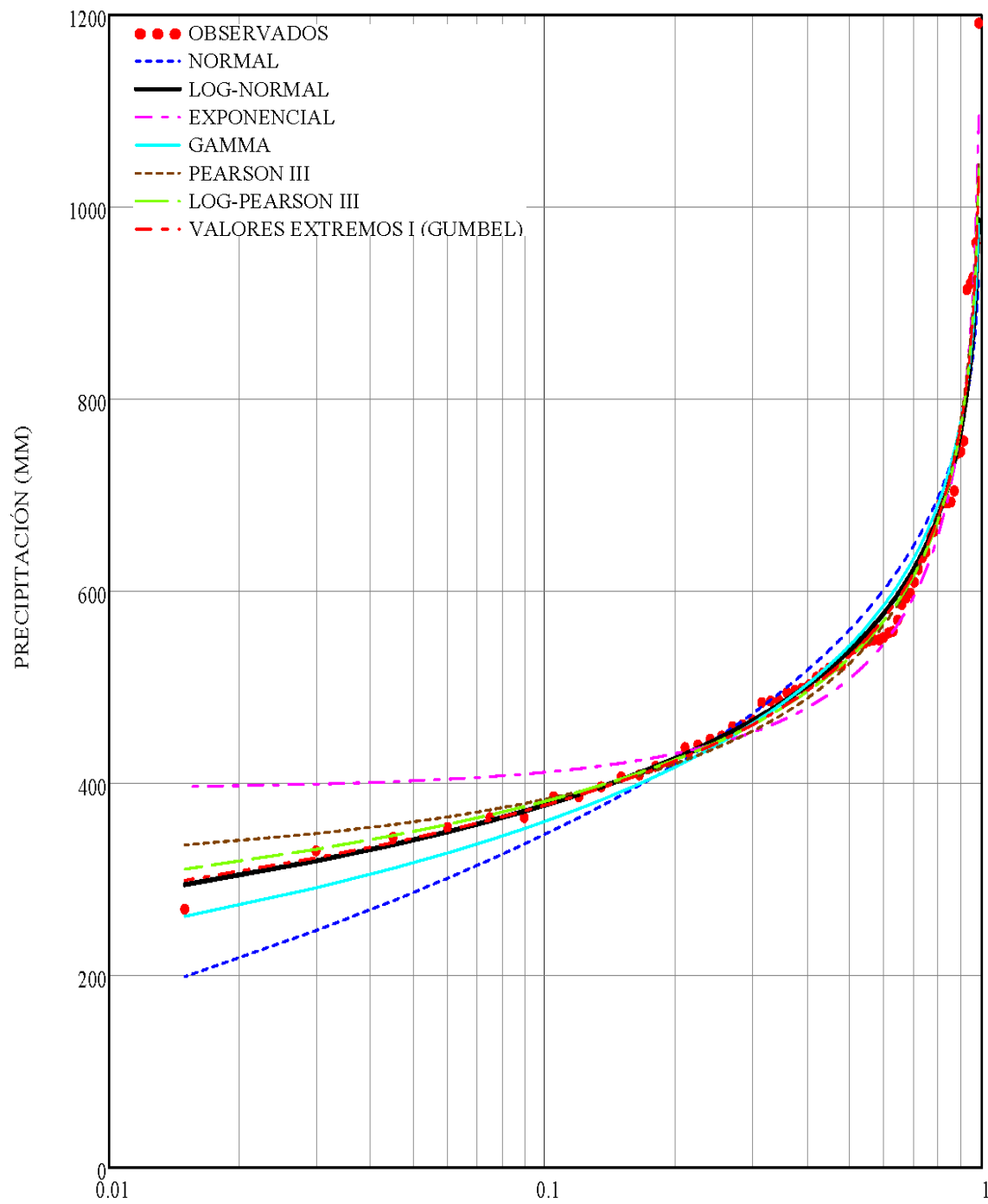








**Figura 21. Precipitación total anual (ajuste método gráfico).**



Los índices de cambio climático se estimaron utilizando el apoyo de programas especializados, como lo es el RClimdex. Además de obtener la calidad de la serie de datos, permite calcular los 27 índices de cambio climático propuestos por el ETCCDI. La Tabla 10 y la Figura 23 a la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos de los índices Rx1day, Rx5day y PRCPTOT respectivamente, analizados en esta investigación.

Tabla 10. Resultados de los índices de cambio climático.

Índice de precipitación máxima en un día							
Año	Rx1day	Año	Rx1day	Año	Rx1day	Año	Rx1day
1960	41.4	1973	42	1986	57.5	1999	100
1961	54.6	1974	129	1987	52.5	2000	67.1
1962	88.5	1975	102.5	1988	253	2001	58.1
1963	75.1	1976	121	1989	32	2002	120
1964	78	1977	63	1990	53.9	2003	72
1965	74	1978	72.5	1991	53.2	2004	100
1966	58	1979	53.5	1992	29.9	2005	165
1967	106.2	1980	51	1993	54.8	2006	88
1968	48.5	1981	51	1994	42.1	2007	56
1969	38	1982	52	1995	39.2	2008	63
1970	61.5	1983	49	1996	78.3	2009	42.6
1971	96	1984	25	1997	35.2	2010	160
1972	42.5	1985	63	1998	33	2011	75

Índice de precipitación máxima en 5 días							
Año	Rx5day	Año	Rx5day	Año	Rx5day	Año	Rx5day
1960	88.1	1973	111.5	1986	131.5	1999	101.9
1961	93.5	1974	238.5	1987	79.1	2000	87.7
1962	103.3	1975	129.5	1988	280.8	2001	107.1
1963	138	1976	317	1989	55	2002	188.4
1964	88.5	1977	75.5	1990	66.7	2003	134.8
1965	163	1978	191.5	1991	90	2004	211
1966	130.5	1979	97	1992	48.8	2005	180
1967	325.6	1980	91	1993	98.5	2006	198
1968	71	1981	126	1994	75.1	2007	132
1969	61	1982	55	1995	72.3	2008	124
1970	77	1983	93	1996	188.6	2009	70.6
1971	131	1984	56.5	1997	60.8	2010	311
1972	95	1985	90	1998	78.1	2011	123

Índice de precipitación total							
Año	PRCPTOT	Año	PRCPTOT	Año	PRCPTOT	Año	PRCPTOT
1960	515.2	1973	548.7	1986	704.8	1999	497.1
1961	484.5	1974	409	1987	545.1	2000	522.3
1962	494.6	1975	692.4	1988	920.3	2001	558.6
1963	510.8	1976	963	1989	269.3	2002	662.3
1964	386.4	1977	407	1990	446.3	2003	743.8
1965	522.5	1978	641	1991	486.9	2004	756.9
1966	692	1979	499.5	1992	440.5	2005	675
1967	914.3	1980	418	1993	635.2	2006	593.5
1968	623	1981	693.5	1994	461.5	2007	692.3
1969	503	1982	330	1995	396.7	2008	570.4
1970	486	1983	549.9	1996	437.6	2009	386.3
1971	586.7	1984	344	1997	546	2010	1191.8
1972	459.3	1985	466	1998	420.8	2011	354.3

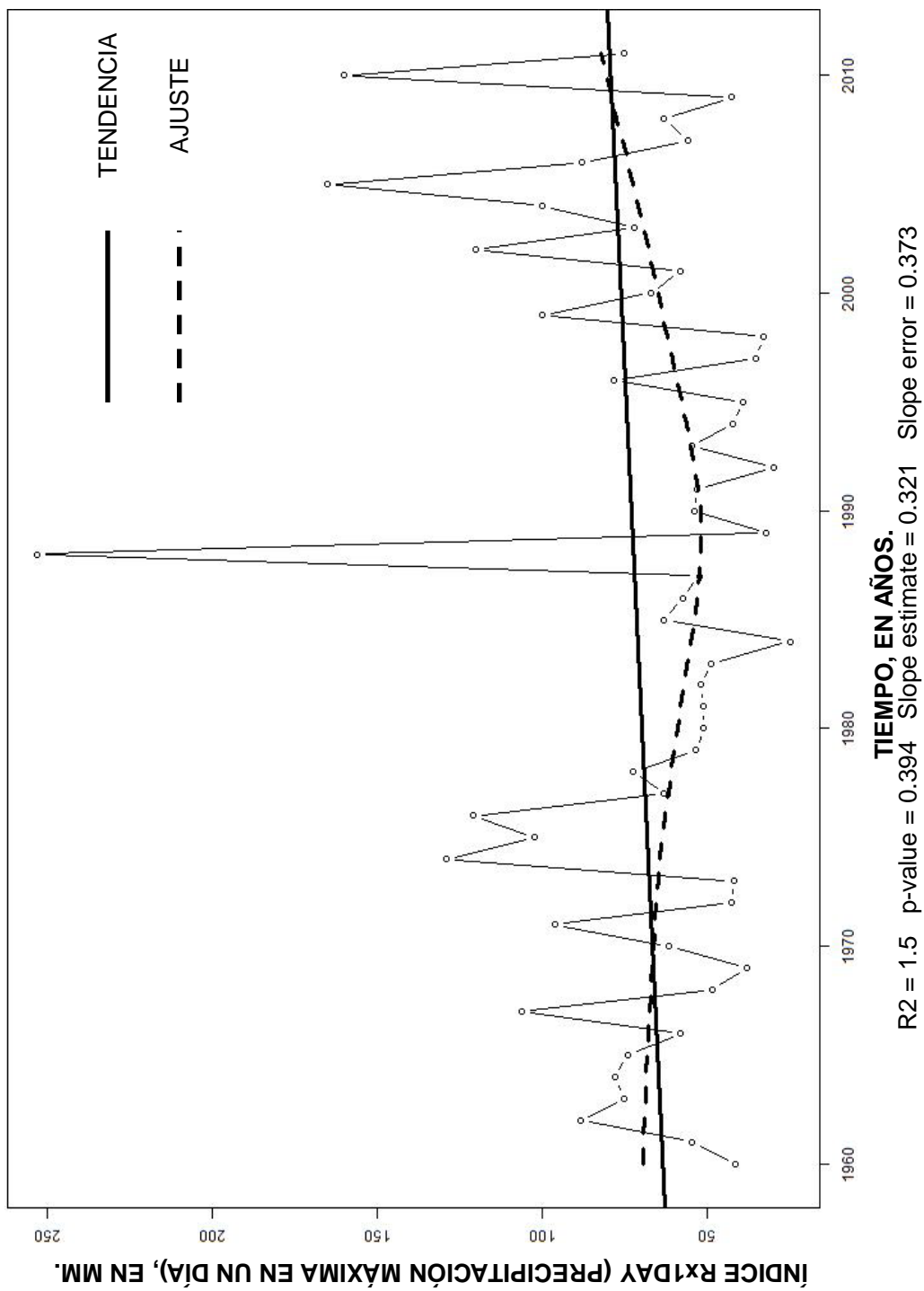


Figura 23. Gráfica índice Rx1day.

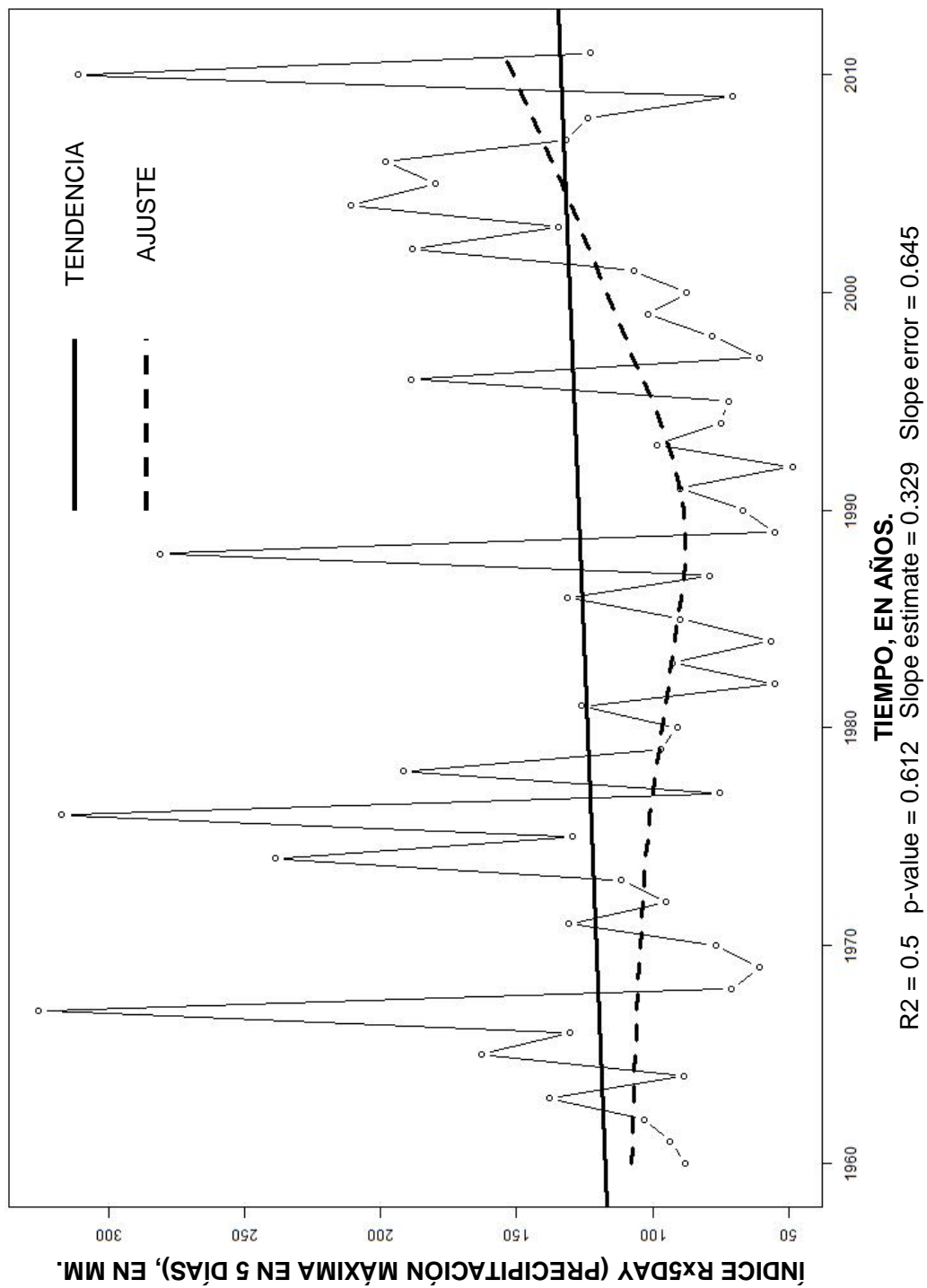


Figura 24. Gráfica índice Rx5day.

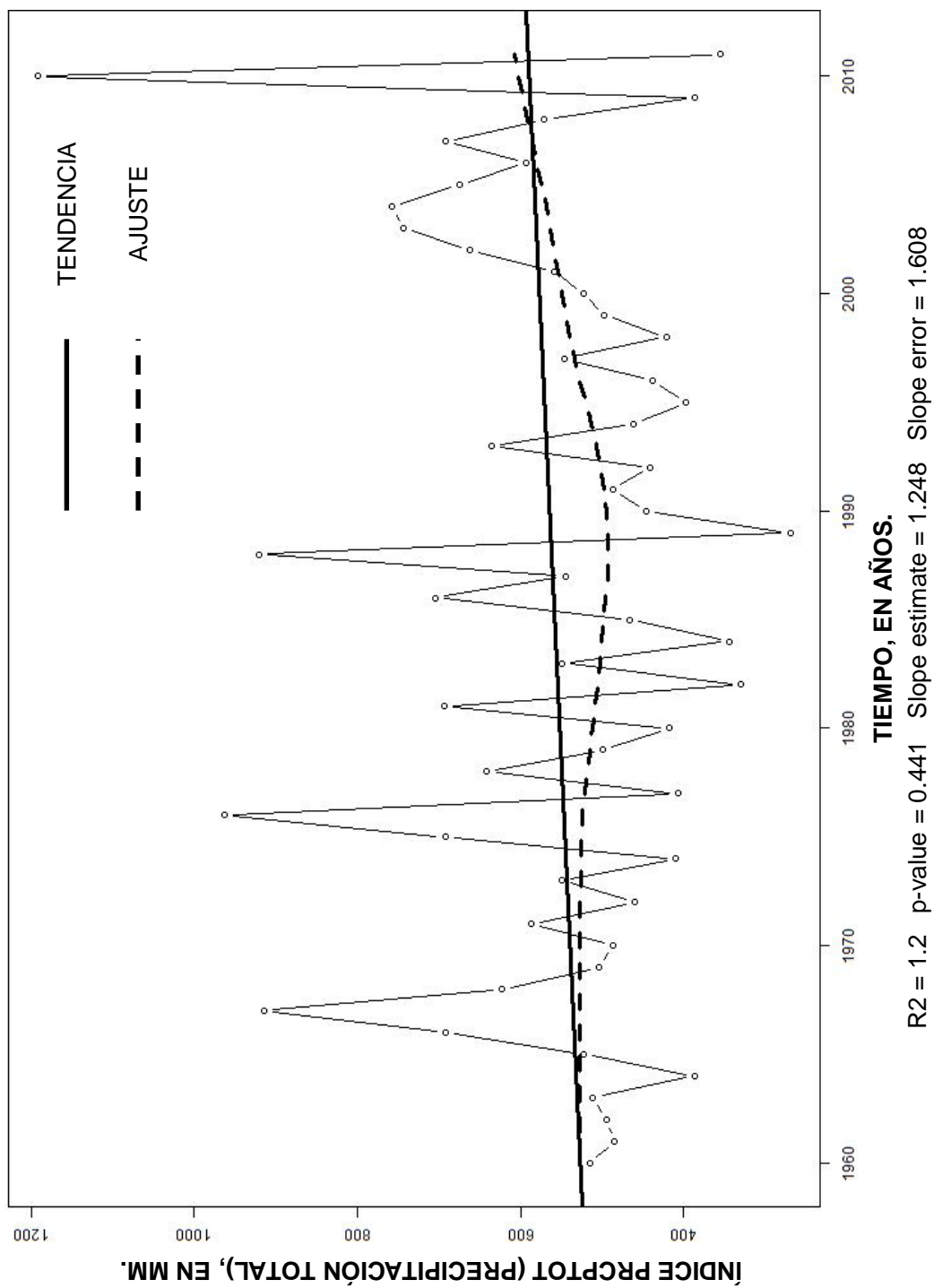


Figura 25. Gráfica índice PRCPTOT.

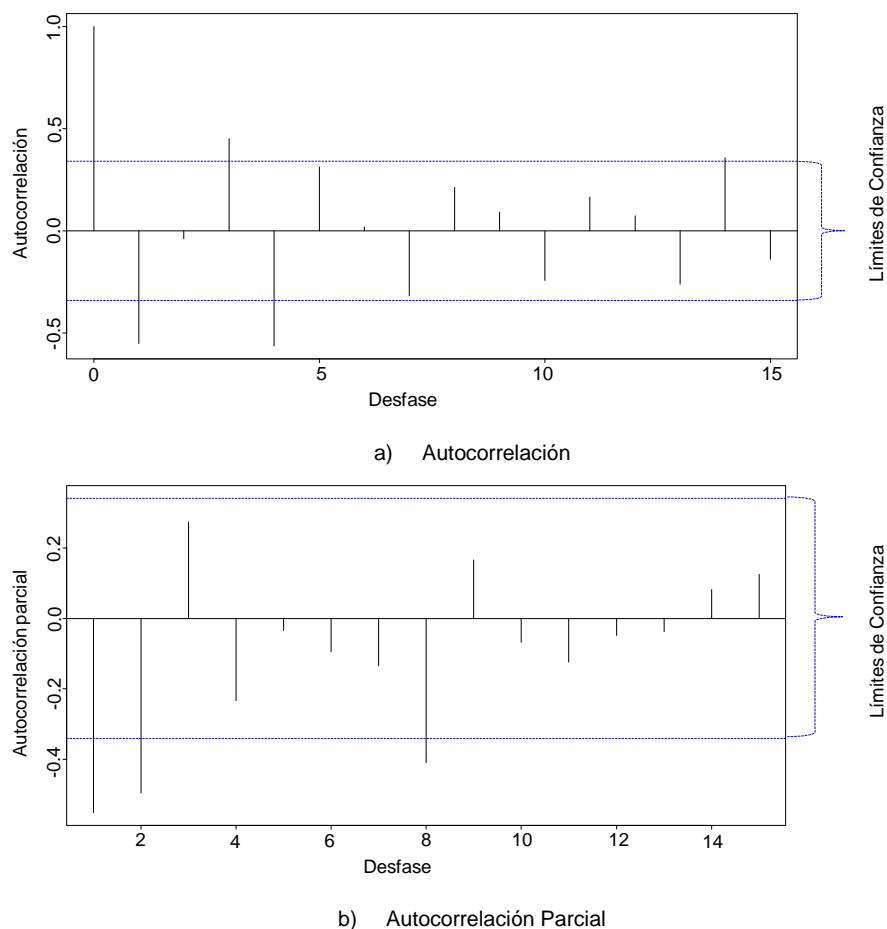
La línea recta continua representa el ajuste de tendencia por mínimos cuadrados, mientras que la línea puntuada representa el ajuste de regresión lineal localmente ponderada. Además, en las gráficas de los índices de cambio climático, se registra la pendiente de la línea de tendencia (slope estimate), la desviación estándar de la misma (slope error), así como el valor p. De acuerdo con Montgomery & Runger (2010), “el valor p es la probabilidad de que el estadístico de prueba asuma un valor que sea al menos tan extremo como el valor observado del estadístico cuando la hipótesis nula  $H_0$ , es verdadera”, en otras palabras, es la probabilidad de que ocurra un evento de igual o mayor magnitud.

Por otro lado, se observó que la mayoría de las estaciones (52.31 %) presentó esta tendencia en aumento, lo que significa un aumento en las precipitaciones pluviales para estas estaciones; sin embargo, cabe señalar que esto no quiere decir que se presentarán más días con lluvias, sino que las lluvias presentadas serán de mayor magnitud y corta duración (lluvia característica de la región), por lo que se pueden hacer presentes los períodos de sequía.

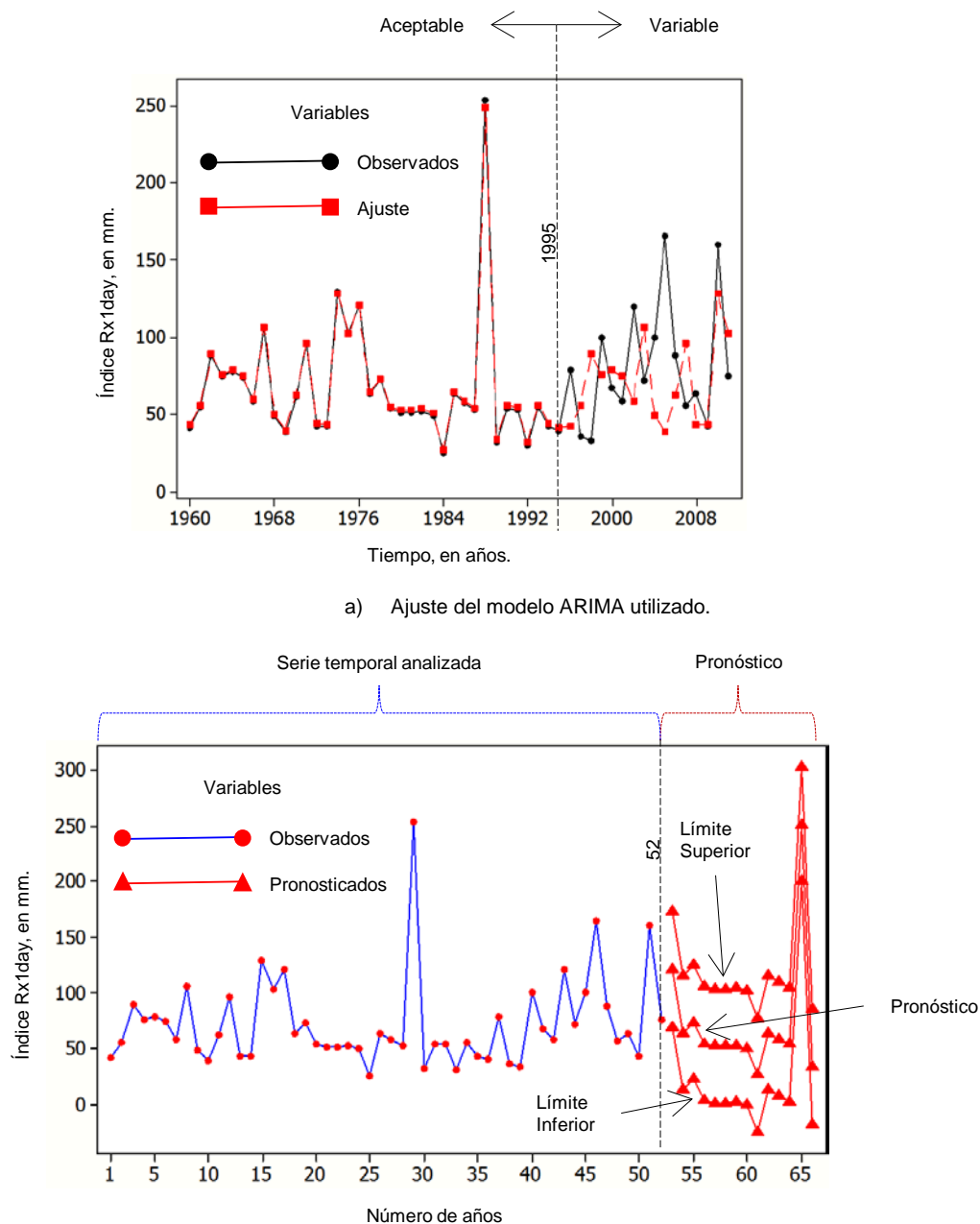
Estos períodos se calcularon a partir de series de datos individuales (por estación climatológica); no obstante, es importante contar con la información representativa de diferentes estaciones climatológicas y ser integrados en una serie regional, logrando de esta manera, ser representativos de la región, tomando en cuenta la correcta distribución de las mismas.



La predicción de las estaciones se elaboró con ayuda de los paquetes computacionales Minitab® y R®. La Figura 26 define la autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) del índice Rx1day. “Los análisis de correlación, análisis de diferencias, autocorrelación y autocorrelación parcial, se utilizan para identificar un modelo adecuado de ARIMA” (Reyes, 2007). La Figura 27 expone las gráficas de ajuste al modelo aplicado, el pronóstico y los límites de confianza del índice Rx1day. Tanto la Figura 18 como la Figura 19 ejemplifican las gráficas de todas las estaciones analizadas.



**Figura 26. Gráficas de autocorrelación y autocorrelación parcial del índice Rx1day.**



b) Pronósticos con el modelo ARIMA correspondiente.

**Figura 27. Gráficas del modelo aplicado del índice Rx1day.**

En el inciso "a", de la Figura 26 se genera la función de autocorrelación con los límites de confianza (intervalos de confianza) al 5 %, para comprobar la hipótesis de que las correlaciones son iguales a cero. Se presentan picos significativos en los

desfases 1 y 2, donde los valores siguientes no decaen rápidamente, patrón típico de un proceso autorregresivo. En el inciso “b”, de la Figura 26 se genera la función de autocorrelación parcial, con los límites de confianza (intervalos de confianza) al 5 %, para comprobar la hipótesis de que las correlaciones son iguales a cero. Se presentan picos significativos en los desfases 1 y 2, lo que se puede atribuir a un modelo ARIMA de 2do orden, que presenta una autocorrelación elevada para esta figura. Cabe mencionar, que los picos que exceden los límites de confianza en la autocorrelación parcial, indican el modelo a aplicar, siempre que estos no estén más allá del desfase anterior, ya que podrá no haber evidencia de un evento aleatorio en ese punto.

En el inciso “a”, de la Figura 27 se presenta el ajuste del modelo ARIMA, aplicado para el índice de cambio climático Rx1day de la estación climatológica 19004 “Apodaca”, en el que se observó que, hasta el año 1995, el ajuste es aceptable y representativo de la serie de datos; no obstante, a partir de éste, el ajuste se vuelve variable, por lo tanto el modelo ARIMA genera mayor incertidumbre en los años subsiguientes; sin embargo, identificar el modelo ARIMA que mejor represente los datos es un proceso exhaustivo, el cual varía conforme la información se actualiza. El inciso “b” de la Figura 27 se muestran los pronósticos para el índice Rx1day de la misma estación climatológica, así como, el intervalo de confianza al 95 % para estos pronósticos.

La construcción de curvas I-D-TR Y HP-D-TR se realizó, como ya se mencionó, con el método propuesto por Campos (1990), encaminado a tratar la información pluviométrica, que permite integrar duraciones pequeñas y grandes (desde 5 minutos hasta 24 horas), desarrollando períodos de retorno desde 5 hasta 100 años; lo anterior, a través de utilizar las fórmulas de F.C. Bell y Cheng-Lung Chen, que han sido probadas en otros países y en México (Campos, 1990; Genovez y Fugagnolli, 2001; Chin, 2006 y Campos et al., 2007; Campos, 2010).

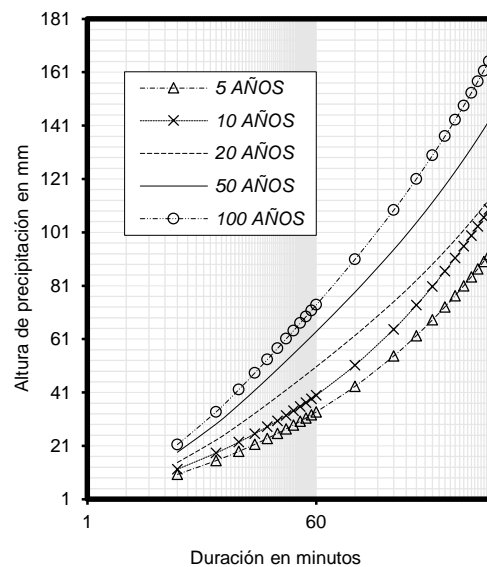
Esto implicó obtener los parámetros regionales para cada estación, para así obtener el cociente lluvia-duración ( $r$ ), que indica la relación que existe entre la precipitación observada en una hora y la precipitación observada en 24 horas (1 día). El procedimiento utilizado fue sugerido recientemente por Campos (2007), y se puede consultar en Campos (2008, 2010); y consiste en combinar la información de isoyetas de intensidad (SCT, 2005) con las precipitaciones máximas en 24 horas. La Tabla 11 muestra la clave CLICOM, cociente lluvia-duración y parámetros regionales para cada estación.

Tabla 11. Cociente lluvia-duración (r) y parámetros regionales a, b y c.

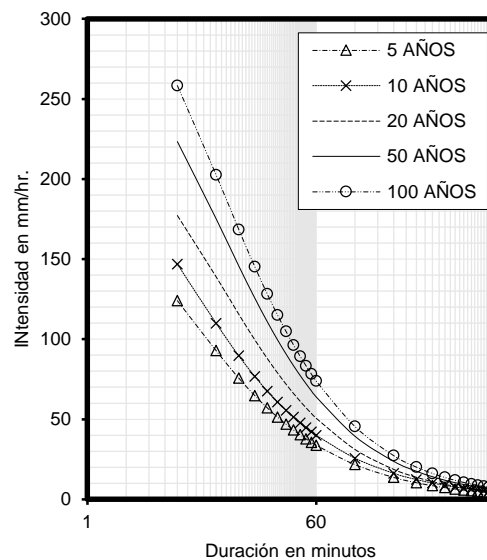
ID	R	Parámetros regionales			ID	R	Parámetros regionales		
		a	b	c			a	b	c
19001	0.1716	7.1690	-0.1343	0.4635	19100	0.3844	21.4854	7.0639	0.7207
19002	0.5258	33.8419	10.3082	0.8306	19104	0.2986	14.5095	4.3301	0.6280
19004	0.4404	26.4817	8.4936	0.7710	19105	0.4936	31.1328	9.6544	0.8102
19005	0.1088	4.5158	-2.4893	0.3341	19106	0.6268	43.4894	11.8325	0.8847
19007	0.3318	17.0438	5.4577	0.6656	19107	0.4000	22.8670	7.4900	0.7357
19008	0.3883	21.8291	7.1726	0.7245	19109	0.3602	19.3899	6.3566	0.6962
19009	0.3297	16.8763	5.3886	0.6633	19110	0.3541	18.8742	6.1695	0.6898
19011	0.6572	48.0407	11.6909	0.8971	19111	0.2204	9.5829	1.5529	0.5328
19015	0.2493	11.2335	2.5777	0.5692	19112	0.6081	41.2897	11.6967	0.8758
19016	0.3392	17.6409	5.6986	0.6737	19113	0.2806	13.2440	3.6956	0.6069
19018	0.2420	10.7987	2.3173	0.5602	19114	0.3054	15.0080	4.5664	0.6358
19020	0.3129	15.5705	4.8241	0.6444	19117	0.5033	31.9558	9.8541	0.8165
19024	0.4282	25.3906	8.2045	0.7609	19119	0.2682	12.4187	3.2536	0.5922
19033	0.1978	8.4140	0.7662	0.5025	19121	0.6559	47.8136	11.7094	0.8966
19035	0.4529	27.5931	8.7793	0.7809	19124	0.3157	15.7838	4.9195	0.6476
19039	0.4047	23.2862	7.6140	0.7400	19125	0.3208	16.1769	5.0920	0.6533
19041	0.3026	14.8014	4.4693	0.6326	19126	0.3629	19.6199	6.4383	0.6990
19042	0.3794	21.0469	6.9224	0.7158	19131	0.4208	24.7274	8.0235	0.7545
19045	0.3020	14.7574	4.4485	0.6319	19134	0.2469	11.0891	2.4920	0.5663
19048	0.3605	19.4154	6.3657	0.6965	19135	0.1619	6.7327	-0.4692	0.4476
19049	0.3896	21.9439	7.2085	0.7258	19138	0.0813	3.4664	-3.8759	0.2465
19050	0.3497	18.5060	6.0325	0.6851	19146	0.3284	16.7731	5.3456	0.6618
19055	0.4137	24.0912	7.8457	0.7482	19154	0.5542	36.2245	10.8583	0.8471
19056	0.3950	22.4223	7.3560	0.7309	19155	0.3329	17.1318	5.4938	0.6668
19057	0.3315	17.0198	5.4479	0.6653	19158	0.4035	23.1790	7.5825	0.7389
19058	0.4044	23.2594	7.6061	0.7398	19160	0.0965	4.0373	-3.0627	0.2982
19064	0.5660	37.2417	11.0740	0.8537	19163	0.4941	31.1754	9.6647	0.8105
19069	0.2120	9.1369	1.2588	0.5218	19166	0.2736	12.7734	3.4464	0.5986
19075	0.0823	3.5032	-3.8181	0.2502	19170	0.3171	15.8911	4.9670	0.6492
19085	0.3062	15.0674	4.5940	0.6367	19172	0.2855	13.5806	3.8694	0.6127
19091	0.3193	16.0607	5.0414	0.6517	19174	0.3363	17.4056	5.6047	0.6706
19093	0.1993	8.4886	0.8180	0.5046	19179	0.0938	3.9341	-3.1978	0.2896
19096	0.4313	25.6682	8.2790	0.7635					

La Figura 28 presenta las curvas HP-D-TR e I-D-TR de la precipitación máxima en 24 horas de la estación 19004. Las abscisas en escala logarítmica, desde 1 minuto hasta 1440 minutos, las ordenadas en escala lineal; en el ámbito profesional, éstas permiten elaborar diseños hidráulicos de tuberías, drenajes, canales, presas, entre otros; y dar una solución eficaz a los problemas que los escurrimientos superficiales ejercen (p. ej. Inundaciones).

Tr (años) duración minutos	5 HP (mm)	10 HP (mm)	20 HP (mm)	50 HP (mm)	100 HP (mm)
5	10.34	12.24	14.76	18.61	21.53
10	15.48	18.32	23.15	29.19	33.77
15	18.93	22.40	28.88	36.41	42.11
20	21.59	25.55	33.18	41.84	48.39
25	23.80	28.16	36.62	46.17	53.40
30	25.69	30.40	39.47	49.77	57.56
35	27.36	32.38	41.91	52.85	61.12
40	28.86	34.15	44.04	55.54	64.23
45	30.22	35.77	45.94	57.93	66.99
50	31.48	37.25	47.64	60.08	69.48
55	32.64	38.63	49.20	62.03	71.75
60	33.73	39.92	50.62	63.83	73.83
120	43.30	51.23	62.33	78.60	90.90
240	54.67	64.69	74.97	94.54	109.34
360	62.30	73.72	83.00	104.66	121.04
480	68.20	80.70	89.04	112.28	129.86
600	73.07	86.47	93.97	118.49	137.04
720	77.27	91.43	98.15	123.76	143.14
840	80.96	95.80	101.81	128.37	148.47
960	84.28	99.73	105.07	132.49	153.23
1080	87.30	103.31	108.02	136.21	157.54
1200	90.08	106.60	110.73	139.62	161.48
1320	92.66	109.65	113.23	142.77	165.13
1440	95.07	112.50	115.55	145.71	168.52



Tr (años) duración minutos	5 (mm/hr)	10 (mm/hr)	20 (mm/hr)	50 (mm/hr)	100 (mm/hr)
5	124.11	146.86	177.13	223.35	258.32
10	92.89	109.91	138.91	175.17	202.59
15	75.71	89.59	115.51	145.65	168.46
20	64.78	76.65	99.54	125.52	145.17
25	57.11	67.58	87.88	110.81	128.16
30	51.38	60.80	78.94	99.54	115.12
35	46.90	55.50	71.84	90.59	104.78
40	43.29	51.22	66.06	83.30	96.35
45	40.30	47.69	61.25	77.23	89.33
50	37.78	44.70	57.17	72.09	83.38
55	35.61	42.14	53.67	67.67	78.27
60	33.73	39.92	50.62	63.83	73.83
120	21.65	25.62	31.17	39.30	45.45
240	13.67	16.17	18.74	23.63	27.33
360	10.38	12.29	13.83	17.44	20.17
480	8.52	10.09	11.13	14.04	16.23
600	7.31	8.65	9.40	11.85	13.70
720	6.44	7.62	8.18	10.31	11.93
840	5.78	6.84	7.27	9.17	10.61
960	5.27	6.23	6.57	8.28	9.58
1080	4.85	5.74	6.00	7.57	8.75
1200	4.50	5.33	5.54	6.98	8.07
1320	4.21	4.98	5.15	6.49	7.51
1440	3.96	4.69	4.81	6.07	7.02

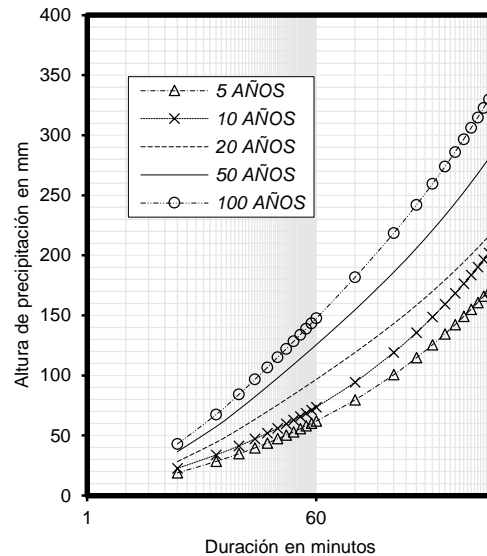


b) Curva de Intensidad – Duración – Período de retorno

**Figura 28. Resultados de la precipitación máxima en 24 horas.**

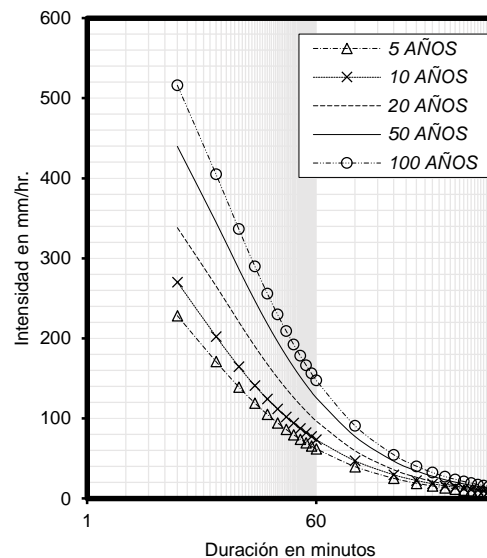
De la Figura 29 a la Figura 33 se presentan los resultados de las curvas HP-D-TR e I-D-TR de Precipitación Máxima Acumulada en 5 días, Precipitación Total Anual, Rx1day, Rx5day y PRCPTOT respectivamente.

Tr (años) duración minutos	5 HP (mm)	10 HP (mm)	20 HP (mm)	50 HP (mm)	100 HP (mm)
5	19.04	22.54	28.20	36.63	43.01
10	28.51	33.73	44.23	57.46	67.47
15	34.85	41.24	55.16	71.67	84.15
20	39.76	47.05	63.38	82.35	96.69
25	43.82	51.85	69.94	90.87	106.70
30	47.31	55.98	75.40	97.95	115.02
35	50.38	59.62	80.06	104.01	122.13
40	53.14	62.88	84.13	109.30	128.35
45	55.66	65.86	87.75	114.01	133.87
50	57.97	68.59	91.01	118.24	138.84
55	60.11	71.13	93.98	122.09	143.36
60	62.12	73.50	96.70	125.63	147.52
120	79.73	94.34	119.07	154.69	181.64
240	100.67	119.13	143.22	186.07	218.48
360	114.71	135.75	158.54	205.98	241.87
480	125.58	148.60	170.10	220.99	259.49
600	134.56	159.23	179.50	233.20	273.83
720	142.28	168.36	187.49	243.58	286.02
840	149.09	176.42	194.47	252.66	296.68
960	155.20	183.65	200.71	260.76	306.19
1080	160.76	190.23	206.35	268.09	314.79
1200	165.88	196.29	211.52	274.80	322.67
1320	170.63	201.91	216.29	281.00	329.96
1440	175.06	207.15	220.73	286.78	336.74



a) Curva de Altura de precipitación – Duración – Período de retorno

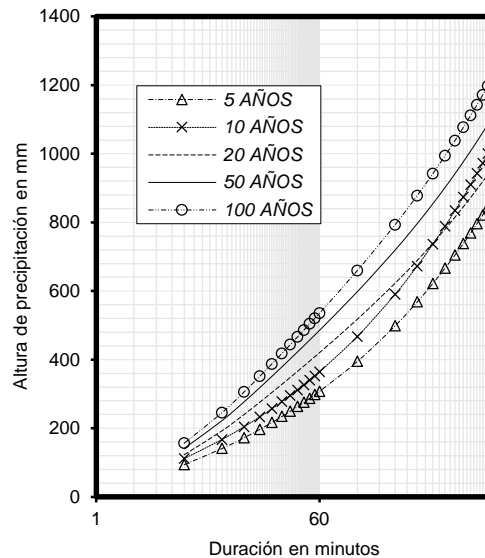
Tr (años) duración minutos	5 (mm/hr)	10 (mm/hr)	20 (mm/hr)	50 (mm/hr)	100 (mm/hr)
5	228.53	270.43	338.36	439.60	516.18
10	171.04	202.40	265.36	344.75	404.82
15	139.41	164.96	220.65	286.67	336.61
20	119.28	141.15	190.15	247.04	290.08
25	105.16	124.44	167.87	218.09	256.09
30	94.61	111.96	150.79	195.91	230.04
35	86.37	102.20	137.24	178.30	209.37
40	79.71	94.33	126.20	163.95	192.52
45	74.21	87.81	117.00	152.01	178.49
50	69.56	82.31	109.21	141.89	166.61
55	65.58	77.60	102.52	133.19	156.40
60	62.12	73.50	96.70	125.63	147.52
120	39.86	47.17	59.53	77.35	90.82
240	25.17	29.78	35.80	46.52	54.62
360	19.12	22.62	26.42	34.33	40.31
480	15.70	18.58	21.26	27.62	32.44
600	13.46	15.92	17.95	23.32	27.38
720	11.86	14.03	15.62	20.30	23.83
840	10.65	12.60	13.89	18.05	21.19
960	9.70	11.48	12.54	16.30	19.14
1080	8.93	10.57	11.46	14.89	17.49
1200	8.29	9.81	10.58	13.74	16.13
1320	7.76	9.18	9.83	12.77	15.00
1440	7.29	8.63	9.20	11.95	14.03



b) Curva de Intensidad – Duración – Período de retorno

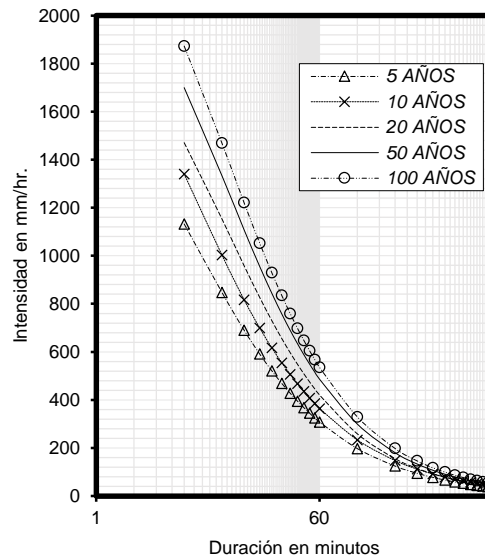
**Figura 29. Resultados de la precipitación máxima acumulada en 5 días.**

Tr (años) duración minutos	5 HP (mm)	10 HP (mm)	20 HP (mm)	50 HP (mm)	100 HP (mm)
5	94.34	111.64	122.53	141.64	156.10
10	141.22	167.11	192.18	222.17	244.85
15	172.65	204.30	239.71	277.10	305.39
20	196.97	233.08	275.43	318.40	350.90
25	217.07	256.86	303.94	351.35	387.22
30	234.34	277.31	327.63	378.74	417.40
35	249.58	295.33	347.88	402.16	443.21
40	263.26	311.52	365.59	422.62	465.76
45	275.71	326.26	381.32	440.80	485.80
50	287.16	339.81	395.48	457.18	503.85
55	297.79	352.38	408.37	472.08	520.27
60	307.71	364.12	420.20	485.76	535.35
120	394.96	467.36	517.40	598.12	659.18
240	498.71	590.14	622.33	719.42	792.86
360	568.28	672.47	688.95	796.43	877.73
480	622.10	736.15	739.15	854.46	941.69
600	666.59	788.80	780.00	901.68	993.73
720	704.83	834.05	814.71	941.81	1037.96
840	738.55	873.95	845.07	976.91	1076.64
960	768.83	909.78	872.16	1008.22	1111.14
1080	796.39	942.39	896.68	1036.56	1142.38
1200	821.74	972.39	919.13	1062.51	1170.98
1320	845.25	1000.21	939.87	1086.50	1197.41
1440	867.22	1026.20	959.18	1108.82	1222.01



a) Curva de Altura de precipitación – Duración – Período de retorno

Tr (años) duración minutos	5 I (mm/hr)	10 I (mm/hr)	20 I (mm/hr)	50 I (mm/hr)	100 I (mm/hr)
5	1132.12	1339.67	1470.32	1699.69	1873.21
10	847.32	1002.66	1153.10	1332.99	1469.07
15	690.61	817.21	958.83	1108.41	1221.56
20	590.90	699.23	826.29	955.19	1052.71
25	520.96	616.47	729.45	843.25	929.34
30	468.69	554.61	655.25	757.48	834.80
35	427.85	506.29	596.37	689.41	759.79
40	394.89	467.28	548.38	633.93	698.65
45	367.61	435.01	508.42	587.74	647.74
50	344.60	407.77	474.57	548.61	604.62
55	324.86	384.42	445.49	514.99	567.57
60	307.71	364.12	420.20	485.76	535.35
120	197.48	233.68	258.70	299.06	329.59
240	124.68	147.54	155.58	179.85	198.22
360	94.71	112.08	114.82	132.74	146.29
480	77.76	92.02	92.39	106.81	117.71
600	66.66	78.88	78.00	90.17	99.37
720	58.74	69.50	67.89	78.48	86.50
840	52.75	62.42	60.36	69.78	76.90
960	48.05	56.86	54.51	63.01	69.45
1080	44.24	52.36	49.82	57.59	63.47
1200	41.09	48.62	45.96	53.13	58.55
1320	38.42	45.46	42.72	49.39	54.43
1440	36.13	42.76	39.97	46.20	50.92

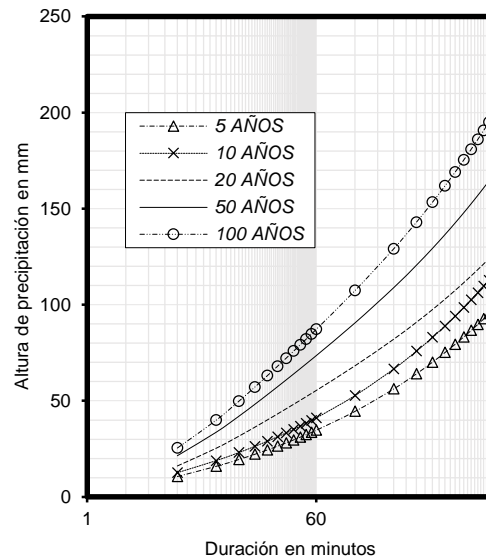


b) Curva de Intensidad – Duración – Período de retorno

**Figura 30. Resultados de la precipitación total anual.**

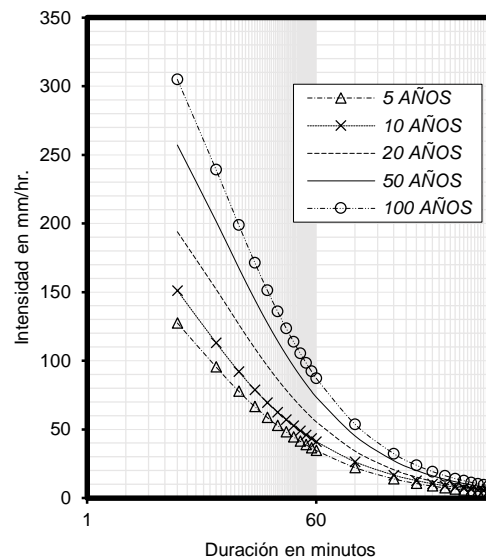


Tr (años)	5	10	20	50	100
duración	HP	HP	HP	HP	HP
minutos	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5	10.64	12.59	16.17	21.43	25.41
10	15.92	18.84	25.36	33.61	39.85
15	19.47	23.03	31.63	41.92	49.71
20	22.21	26.28	36.34	48.17	57.12
25	24.47	28.96	40.10	53.15	63.03
30	26.42	31.27	43.22	57.30	67.94
35	28.14	33.30	45.90	60.84	72.14
40	29.68	35.12	48.23	63.94	75.82
45	31.09	36.78	50.31	66.69	79.08
50	32.38	38.31	52.18	69.16	82.01
55	33.57	39.73	53.88	71.42	84.69
60	34.69	41.05	55.44	73.49	87.14
120	44.53	52.69	68.26	90.49	107.30
240	56.23	66.54	82.11	108.84	129.06
360	64.07	75.82	90.89	120.49	142.87
480	70.14	83.00	97.52	129.27	153.28
600	75.15	88.93	102.91	136.41	161.75
720	79.47	94.04	107.49	142.48	168.95
840	83.27	98.53	111.49	147.79	175.25
960	86.68	102.57	115.07	152.53	180.87
1080	89.79	106.25	118.30	156.82	185.95
1200	92.65	109.63	121.26	160.74	190.61
1320	95.30	112.77	124.00	164.37	194.91
1440	97.77	115.70	126.55	167.75	198.91



a) Curva de Altura de precipitación – Duración – Período de retorno

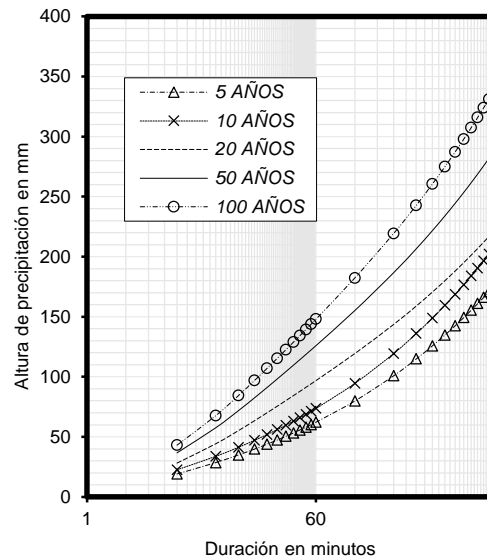
Tr (años)	5	10	20	50	100
duración	I	I	I	I	I
minutos	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)
5	127.64	151.04	193.98	257.14	304.91
10	95.53	113.05	152.13	201.66	239.13
15	77.86	92.14	126.50	167.69	198.84
20	66.62	78.83	109.01	144.51	171.36
25	58.74	69.50	96.24	127.57	151.27
30	52.84	62.53	86.45	114.59	135.89
35	48.24	57.08	78.68	104.30	123.68
40	44.52	52.68	72.35	95.90	113.72
45	41.45	49.05	67.08	88.92	105.44
50	38.85	45.97	62.61	83.00	98.42
55	36.63	43.34	58.78	77.91	92.39
60	34.69	41.05	55.44	73.49	87.14
120	22.26	26.35	34.13	45.24	53.65
240	14.06	16.63	20.53	27.21	32.26
360	10.68	12.64	15.15	20.08	23.81
480	8.77	10.37	12.19	16.16	19.16
600	7.52	8.89	10.29	13.64	16.18
720	6.62	7.84	8.96	11.87	14.08
840	5.95	7.04	7.96	10.56	12.52
960	5.42	6.41	7.19	9.53	11.30
1080	4.99	5.90	6.57	8.71	10.33
1200	4.63	5.48	6.06	8.04	9.53
1320	4.33	5.13	5.64	7.47	8.86
1440	4.07	4.82	5.27	6.99	8.29



b) Curva de Intensidad – Duración – Período de retorno

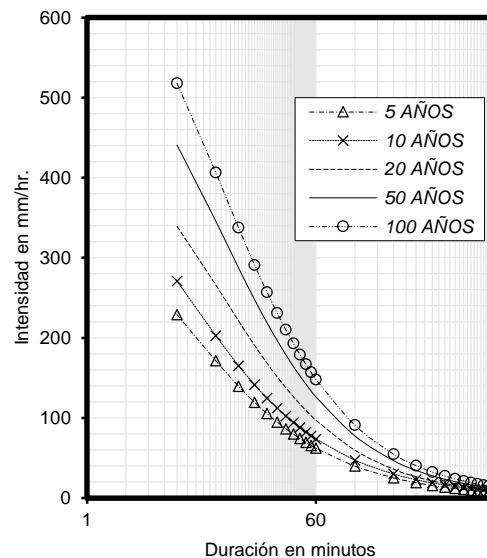
**Figura 31. Resultados del índice Rx1day.**

Tr (años)	5	10	20	50	100
duración	HP	HP	HP	HP	HP
minutos	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5	19.08	22.57	28.27	36.75	43.17
10	28.55	33.79	44.34	57.64	67.71
15	34.91	41.31	55.30	71.90	84.45
20	39.83	47.13	63.54	82.61	97.04
25	43.89	51.94	70.12	91.16	107.08
30	47.38	56.07	75.59	98.27	115.43
35	50.47	59.72	80.26	104.35	122.57
40	53.23	62.99	84.34	109.66	128.80
45	55.75	65.97	87.97	114.37	134.34
50	58.06	68.71	91.24	118.62	139.33
55	60.21	71.25	94.22	122.49	143.87
60	62.22	73.63	96.95	126.04	148.04
120	79.86	94.50	119.37	155.19	182.29
240	100.84	119.33	143.58	186.66	219.26
360	114.91	135.97	158.95	206.64	242.73
480	125.79	148.85	170.53	221.70	260.41
600	134.79	159.50	179.95	233.95	274.80
720	142.52	168.65	187.96	244.37	287.04
840	149.34	176.71	194.97	253.47	297.73
960	155.46	183.96	201.22	261.60	307.27
1080	161.03	190.55	206.87	268.95	315.91
1200	166.16	196.62	212.05	275.69	323.82
1320	170.91	202.24	216.84	281.91	331.13
1440	175.35	207.50	221.29	287.70	337.93



a) Curva de Altura de precipitación – Duración – Período de retorno

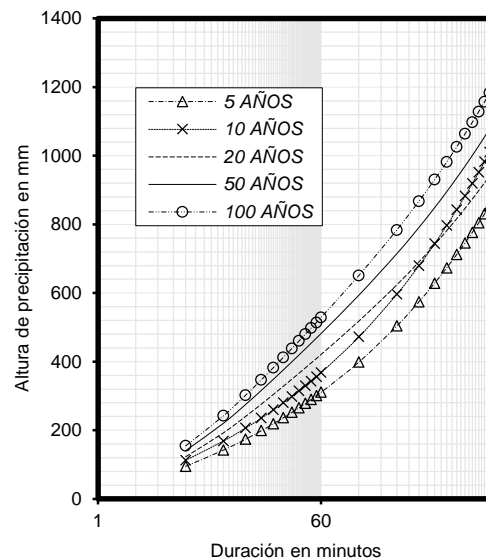
Tr (años)	5	10	20	50	100
duración	I	I	I	I	I
minutos	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)
5	228.92	270.88	339.22	441.01	518.02
10	171.33	202.74	266.03	345.87	406.26
15	139.64	165.24	221.21	287.59	337.81
20	119.48	141.38	190.63	247.84	291.11
25	105.34	124.65	168.29	218.79	257.00
30	94.77	112.14	151.17	196.54	230.86
35	86.51	102.37	137.59	178.88	210.11
40	79.85	94.49	126.52	164.48	193.20
45	74.33	87.96	117.30	152.50	179.12
50	69.68	82.45	109.49	142.35	167.20
55	65.69	77.73	102.78	133.62	156.95
60	62.22	73.63	96.95	126.04	148.04
120	39.93	47.25	59.69	77.60	91.14
240	25.21	29.83	35.89	46.67	54.81
360	19.15	22.66	26.49	34.44	40.45
480	15.72	18.61	21.32	27.71	32.55
600	13.48	15.95	18.00	23.40	27.48
720	11.88	14.05	15.66	20.36	23.92
840	10.67	12.62	13.93	18.11	21.27
960	9.72	11.50	12.58	16.35	19.20
1080	8.95	10.59	11.49	14.94	17.55
1200	8.31	9.83	10.60	13.78	16.19
1320	7.77	9.19	9.86	12.81	15.05
1440	7.31	8.65	9.22	11.99	14.08



b) Curva de Intensidad – Duración – Período de retorno

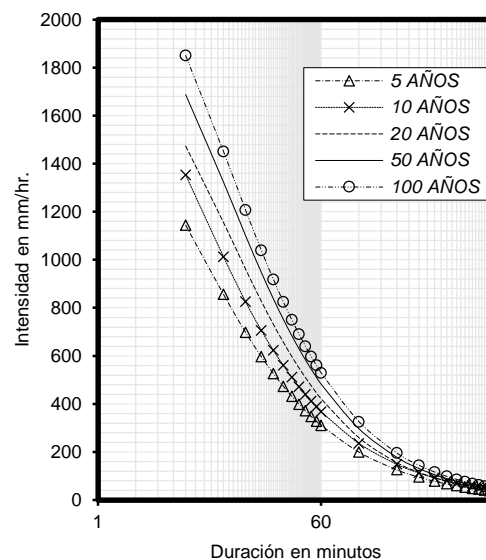
**Figura 32. Resultados del índice Rx5day.**

Tr (años)	5	10	20	50	100
Duración	HP	HP	HP	HP	HP
Minutos	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5	95.32	112.79	122.73	140.64	154.18
10	142.68	168.84	192.50	220.59	241.84
15	174.44	206.42	240.10	275.14	301.64
20	199.00	235.48	275.89	316.14	346.59
25	219.31	259.52	304.44	348.86	382.46
30	236.77	280.17	328.17	376.05	412.27
35	252.16	298.39	348.46	399.30	437.76
40	265.98	314.74	366.19	419.62	460.04
45	278.56	329.63	381.95	437.68	479.83
50	290.13	343.32	396.13	453.93	497.65
55	300.87	356.02	409.05	468.73	513.87
60	310.89	367.89	420.90	482.31	528.77
120	399.04	472.20	518.26	593.88	651.08
240	503.87	596.24	623.36	714.32	783.12
360	574.16	679.42	690.09	790.78	866.94
480	628.53	743.76	740.38	848.40	930.12
600	673.48	796.95	781.29	895.28	981.51
720	712.12	842.67	816.07	935.13	1025.20
840	746.19	882.98	846.48	969.98	1063.41
960	776.78	919.18	873.60	1001.06	1097.49
1080	804.62	952.13	898.16	1029.21	1128.34
1200	830.23	982.44	920.65	1054.98	1156.59
1320	853.99	1010.55	941.43	1078.79	1182.70
1440	876.18	1036.81	960.77	1100.95	1206.99



a) Curva de Altura de precipitación – Duración – Período de retorno

Tr (años)	5	10	20	50	100
Duración	I	I	I	I	I
Minutos	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)	(mm/hr)
5	1143.82	1353.52	1472.76	1687.64	1850.19
10	856.08	1013.02	1155.01	1323.53	1451.01
15	697.74	825.66	960.42	1100.54	1206.55
20	597.00	706.45	827.66	948.42	1039.77
25	526.35	622.84	730.66	837.27	917.91
30	473.53	560.35	656.34	752.10	824.54
35	432.27	511.52	597.36	684.52	750.45
40	398.97	472.11	549.29	629.43	690.06
45	371.41	439.51	509.27	583.57	639.78
50	348.16	411.99	475.36	544.72	597.18
55	328.22	388.39	446.23	511.34	560.59
60	310.89	367.89	420.90	482.31	528.77
120	199.52	236.10	259.13	296.94	325.54
240	125.97	149.06	155.84	178.58	195.78
360	95.69	113.24	115.01	131.80	144.49
480	78.57	92.97	92.55	106.05	116.26
600	67.35	79.69	78.13	89.53	98.15
720	59.34	70.22	68.01	77.93	85.43
840	53.30	63.07	60.46	69.28	75.96
960	48.55	57.45	54.60	62.57	68.59
1080	44.70	52.90	49.90	57.18	62.69
1200	41.51	49.12	46.03	52.75	57.83
1320	38.82	45.93	42.79	49.04	53.76
1440	36.51	43.20	40.03	45.87	50.29

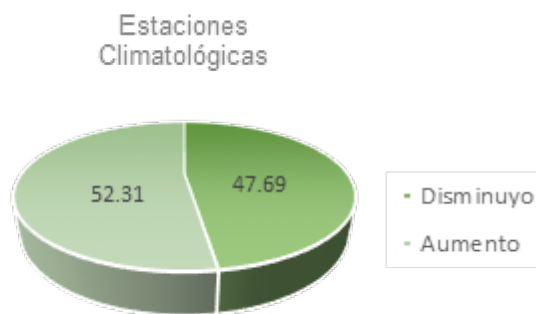


b) Curva de Intensidad – Duración – Período de retorno

**Figura 33. Resultados del índice PRCPTOT.**

### 3.4. CONTRASTE DE PRECIPITACIONES CONTRA LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las Tabla 11, 12 y 13 muestran los resultados del análisis del contraste de precipitaciones contra los índices de cambio climático, donde se observó que más de la mitad (52.31 %) de las estaciones comprende una tendencia positiva; es decir, indican un claro incremento en las precipitaciones en la región; por otro lado, el 47.69 % restante presenta una tendencia decreciente (Figura 34), lo que implica períodos de sequía más extensos que los habituales.



**Figura 34. Porcentaje de estaciones que aumentan/disminuyen su precipitación pluvial.**

Aunado a lo anterior, un claro ejemplo de este incremento es la estación climatológica 19004 “Apodaca”, donde se observan incrementos del 21.2 % para precipitaciones máximas en 24 horas, así como, un 0.4 % para precipitaciones máximas acumuladas en 5 días, y 1.0 % para precipitaciones totales anuales. Este comportamiento no es igual en todas las estaciones, pues varió dependiendo de su ubicación geoespacial y temporal (ver Figuras 35, 36 y 37).

Tabla 12. Contraste de precipitaciones máximas en 24 horas Vs Rx1day.

ID	Porcentaje de afectación								
	Periodo de Retorno								
	2	5	10	20	50	100	500	1000	10000
19001	11.3%	11.3%	11.3%	0.0%	-9.9%	-15.1%	-23.4%	-25.8%	-31.7%
19002	5.8%	5.8%	5.8%	22.8%	32.8%	37.1%	42.5%	44.0%	47.0%
19004	2.8%	2.8%	2.8%	8.7%	13.1%	15.3%	18.4%	19.2%	21.2%
19005	-7.3%	-7.3%	-7.3%	-4.9%	-3.0%	-2.1%	-0.9%	-0.5%	0.3%
19007	3.2%	3.2%	3.2%	1.9%	0.8%	0.2%	-0.7%	-1.0%	-1.6%
19008	3.4%	3.4%	3.4%	3.3%	3.2%	3.2%	3.1%	3.1%	3.1%
19009	0.1%	0.1%	0.1%	-15.6%	-28.4%	-34.9%	-44.7%	-47.6%	-54.1%
19011	12.1%	12.1%	12.1%	10.0%	8.1%	7.1%	5.6%	5.2%	4.2%
19015	3.9%	3.9%	3.9%	-7.4%	-17.5%	-23.0%	-31.9%	-34.6%	-41.1%
19016	-3.0%	-3.0%	-3.0%	5.5%	11.8%	14.9%	19.2%	20.5%	23.2%
19018	0.5%	0.5%	0.5%	-0.1%	-0.7%	-1.0%	-1.4%	-1.5%	-1.8%
19020	9.6%	9.6%	9.6%	13.8%	17.4%	19.3%	22.1%	23.0%	25.0%
19024	8.7%	8.7%	8.7%	7.3%	6.0%	5.3%	4.0%	3.6%	2.7%
19033	-9.0%	-9.0%	-9.0%	-23.5%	-34.7%	-40.1%	-48.1%	-50.3%	-55.4%
19035	-4.7%	-4.7%	-4.7%	-4.4%	-4.0%	-3.8%	-3.5%	-3.4%	-3.2%
19039	3.6%	3.6%	3.6%	1.7%	-0.1%	-1.0%	-2.6%	-3.0%	-4.2%
19041	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-9.4%	-16.0%	-19.4%	-24.5%	-26.0%	-29.4%
19042	-0.9%	-0.9%	-0.9%	-2.7%	-4.5%	-5.6%	-7.6%	-8.2%	-9.8%
19045	-1.6%	-1.6%	-1.6%	-3.4%	-4.8%	-5.5%	-6.4%	-6.7%	-7.2%
19048	-4.5%	-4.5%	-4.5%	-4.0%	-3.6%	-3.4%	-3.0%	-2.8%	-2.5%
19049	5.5%	5.5%	5.5%	0.0%	-5.2%	-8.0%	-12.8%	-14.3%	-17.8%
19050	-4.4%	-4.4%	-4.4%	-4.0%	-3.7%	-3.5%	-3.2%	-3.1%	-2.9%
19055	-2.8%	-2.8%	-2.8%	-3.5%	-4.2%	-4.6%	-5.3%	-5.5%	-6.0%
19056	1.3%	1.3%	1.3%	0.6%	-0.2%	-0.6%	-1.3%	-1.6%	-2.1%
19057	-4.8%	-4.8%	-4.8%	-9.8%	-14.0%	-16.3%	-19.8%	-20.8%	-23.2%
19058	4.1%	4.1%	4.1%	-1.0%	-5.8%	-8.5%	-13.0%	-14.3%	-17.7%
19064	4.1%	4.1%	4.1%	0.7%	-2.5%	-4.3%	-7.2%	-8.2%	-10.4%
19069	12.7%	12.7%	12.7%	5.2%	-1.2%	-4.6%	-9.8%	-11.4%	-15.0%
19075	0.5%	0.5%	0.5%	-3.8%	-8.6%	-11.8%	-17.8%	-20.0%	-25.9%
19085	11.6%	11.6%	11.6%	12.4%	13.1%	13.4%	13.9%	14.0%	14.4%
19091	4.7%	4.7%	4.7%	6.1%	7.1%	7.6%	8.3%	8.5%	9.0%
19093	17.8%	17.8%	17.8%	12.8%	8.0%	5.3%	0.7%	-0.8%	-4.5%
19096	14.1%	14.1%	14.1%	7.7%	2.2%	-0.7%	-5.2%	-6.5%	-9.6%
19100	2.0%	2.0%	2.0%	-0.7%	-3.6%	-5.4%	-8.8%	-9.9%	-13.0%
19104	13.4%	13.4%	13.4%	10.2%	7.4%	5.9%	3.6%	2.8%	1.1%
19105	0.6%	0.6%	0.6%	1.3%	1.9%	2.3%	2.8%	3.0%	3.4%
19106	23.4%	23.4%	23.4%	24.3%	25.0%	25.4%	26.0%	26.1%	26.5%
19107	1.6%	1.6%	1.6%	-2.2%	-5.5%	-7.3%	-10.1%	-11.0%	-13.0%
19109	4.9%	4.9%	4.9%	-1.3%	-7.3%	-10.8%	-16.7%	-18.6%	-23.2%
19110	-2.1%	-2.1%	-2.1%	-0.9%	0.2%	0.8%	1.7%	2.0%	2.7%
19111	14.1%	14.1%	14.1%	12.7%	11.5%	10.9%	9.8%	9.5%	8.8%
19112	-5.3%	-5.3%	-5.3%	-9.1%	-12.8%	-14.9%	-18.4%	-19.6%	-22.3%
19113	11.7%	11.7%	11.7%	12.9%	13.9%	14.4%	15.2%	15.5%	16.1%
19114	1.4%	1.4%	1.4%	0.3%	-0.7%	-1.2%	-2.0%	-2.3%	-2.8%
19117	0.6%	0.6%	0.6%	-0.9%	-2.4%	-3.3%	-4.8%	-5.3%	-6.6%
19119	1.0%	1.0%	1.0%	3.1%	4.9%	5.7%	7.1%	7.5%	8.4%
19121	8.7%	8.7%	8.7%	3.8%	-0.5%	-2.8%	-6.5%	-7.7%	-10.3%
19124	9.1%	9.1%	9.1%	5.4%	2.0%	0.2%	-2.8%	-3.8%	-6.0%
19125	15.2%	15.2%	15.2%	12.8%	10.2%	8.6%	5.6%	4.5%	1.8%
19126	-1.8%	-1.8%	-1.8%	0.6%	2.3%	3.1%	4.1%	4.4%	5.0%
19131	2.8%	2.8%	2.8%	1.1%	-0.4%	-1.2%	-2.6%	-3.0%	-4.0%
19134	10.3%	10.3%	10.3%	9.8%	9.3%	9.1%	8.7%	8.6%	8.3%
19135	10.0%	10.0%	10.0%	11.7%	13.1%	13.8%	14.9%	15.2%	16.0%
19138	-2.1%	-2.1%	-2.1%	-2.6%	-3.2%	-3.5%	-4.0%	-4.1%	-4.5%
19146	-1.6%	-1.6%	-1.6%	1.2%	3.4%	4.5%	6.1%	6.6%	7.7%
19154	8.4%	8.4%	8.4%	6.7%	5.1%	4.1%	2.4%	1.9%	0.6%
19155	6.1%	6.1%	6.1%	4.9%	4.0%	3.4%	2.6%	2.4%	1.8%
19158	-0.3%	-0.3%	-0.3%	-0.4%	-0.5%	-0.6%	-0.7%	-0.7%	-0.7%
19160	-4.5%	-4.5%	-4.5%	0.1%	4.5%	6.9%	10.9%	12.2%	15.1%
19163	6.7%	6.7%	6.7%	-4.5%	-14.9%	-20.6%	-30.0%	-32.9%	-39.9%
19166	13.2%	13.2%	13.2%	8.5%	5.2%	3.6%	1.4%	0.8%	-0.6%
19170	-3.2%	-3.2%	-3.2%	-2.5%	-1.9%	-1.5%	-0.9%	-0.7%	-0.3%
19172	36.8%	36.8%	36.8%	29.0%	21.0%	16.1%	7.7%	4.9%	-2.3%
19174	-11.9%	-11.9%	-11.9%	-8.6%	-5.6%	-4.0%	-1.6%	-0.8%	0.9%
19179	13.4%	13.4%	13.4%	8.2%	2.3%	-1.5%	-8.7%	-11.3%	-18.2%

Tabla 13. Contraste de precipitaciones máximas acumuladas en 5 días Vs

ID	Rx5day. Porcentaje de afectación Período de Retorno								
	2	5	10	20	50	100	500	1000	10000
19001	12.5%	12.5%	12.5%	10.3%	8.8%	8.2%	7.2%	7.0%	6.4%
19002	33.8%	33.8%	33.8%	28.6%	24.8%	23.0%	20.6%	19.9%	18.4%
19004	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%
19005	0.3%	0.3%	0.3%	-8.9%	-16.8%	-20.9%	-27.2%	-29.1%	-33.4%
19007	3.6%	3.6%	3.6%	-0.6%	-4.5%	-6.7%	-10.2%	-11.3%	-13.9%
19008	1.6%	1.6%	1.6%	0.9%	0.1%	-0.3%	-1.1%	-1.4%	-2.0%
19009	7.5%	7.5%	7.5%	3.2%	-0.3%	-2.0%	-4.6%	-5.3%	-6.9%
19011	4.8%	4.8%	4.8%	2.2%	-0.2%	-1.5%	-3.7%	-4.3%	-6.0%
19015	1.5%	1.5%	1.5%	-5.4%	-11.7%	-15.1%	-20.5%	-22.1%	-26.0%
19016	5.5%	5.5%	5.5%	-2.3%	-9.5%	-13.5%	-20.0%	-22.0%	-26.9%
19018	11.6%	11.6%	11.6%	11.3%	11.0%	10.9%	10.7%	10.6%	10.5%
19020	12.6%	12.6%	12.6%	8.3%	4.5%	2.5%	-0.6%	-1.5%	-3.6%
19024	-1.7%	-1.7%	-1.7%	-1.8%	-1.9%	-1.9%	-2.0%	-2.0%	-2.0%
19033	-3.1%	-3.1%	-3.1%	-4.5%	-5.4%	-5.8%	-6.2%	-6.4%	-6.6%
19035	-3.5%	-3.5%	-3.5%	-3.5%	-3.6%	-3.6%	-3.7%	-3.7%	-3.8%
19039	3.8%	3.8%	3.8%	2.9%	2.1%	1.7%	1.1%	0.8%	0.4%
19041	1.4%	1.4%	1.4%	0.4%	-0.4%	-0.9%	-1.5%	-1.6%	-2.0%
19042	0.1%	0.1%	0.1%	0.8%	1.5%	1.8%	2.4%	2.6%	3.1%
19045	6.9%	6.9%	6.9%	3.8%	1.4%	0.2%	-1.5%	-2.0%	-3.1%
19048	3.2%	3.2%	3.2%	2.4%	1.6%	1.2%	0.5%	0.3%	-0.2%
19049	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-2.3%	-3.0%	-3.4%	-3.9%	-4.0%	-4.4%
19050	0.2%	0.2%	0.2%	0.6%	1.1%	1.3%	1.8%	1.9%	2.3%
19055	-3.6%	-3.6%	-3.6%	-2.9%	-2.2%	-1.8%	-1.2%	-1.1%	-0.6%
19056	-2.8%	-2.8%	-2.8%	-4.7%	-6.5%	-7.6%	-9.2%	-9.7%	-11.0%
19057	0.2%	0.2%	0.2%	0.0%	-0.1%	-0.2%	-0.4%	-0.5%	-0.6%
19058	-2.8%	-2.8%	-2.8%	-3.2%	-3.5%	-3.6%	-3.9%	-4.0%	-4.1%
19064	-1.3%	-1.3%	-1.3%	-3.5%	-5.4%	-6.3%	-7.8%	-8.2%	-9.2%
19069	10.4%	10.4%	10.4%	7.7%	5.4%	4.1%	2.1%	1.5%	0.1%
19075	-2.7%	-2.7%	-2.7%	0.1%	3.2%	5.2%	8.7%	9.9%	13.1%
19085	-3.4%	-3.4%	-3.4%	-1.7%	-0.2%	0.5%	1.7%	2.0%	2.8%
19091	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-8.5%	-7.7%	-7.3%	-6.6%	-6.4%	-6.0%
19093	-1.1%	-1.1%	-1.1%	-3.0%	-4.7%	-5.6%	-7.0%	-7.4%	-8.4%
19096	13.6%	13.6%	13.6%	16.7%	18.7%	19.6%	20.8%	21.1%	21.8%
19100	19.5%	19.5%	19.5%	13.4%	7.1%	3.2%	-3.7%	-6.1%	-12.0%
19104	19.1%	19.1%	19.1%	8.7%	-1.7%	-7.8%	-18.4%	-21.9%	-30.5%
19105	8.7%	8.7%	8.7%	8.6%	8.5%	8.5%	8.4%	8.3%	8.3%
19106	-4.2%	-4.2%	-4.2%	-4.3%	-4.3%	-4.4%	-4.4%	-4.4%	-4.5%
19107	15.7%	15.7%	15.7%	21.7%	26.5%	29.0%	32.6%	33.6%	36.0%
19109	5.4%	5.4%	5.4%	2.7%	0.2%	-1.2%	-3.5%	-4.3%	-6.0%
19110	16.9%	16.9%	16.9%	7.2%	-2.8%	-8.8%	-19.2%	-22.7%	-31.5%
19111	13.2%	13.2%	13.2%	16.1%	18.5%	19.8%	21.9%	22.5%	23.9%
19112	3.0%	3.0%	3.0%	-0.7%	-4.6%	-6.9%	-10.9%	-12.2%	-15.6%
19113	4.2%	4.2%	4.2%	12.6%	19.2%	22.4%	27.2%	28.6%	31.8%
19114	1.7%	1.7%	1.7%	-1.9%	-5.2%	-7.0%	-10.0%	-10.9%	-13.0%
19117	-1.4%	-1.4%	-1.4%	-4.6%	-8.0%	-10.1%	-13.9%	-15.2%	-18.6%
19119	0.9%	0.9%	0.9%	-3.9%	-8.4%	-11.0%	-15.2%	-16.5%	-19.6%
19121	10.5%	10.5%	10.5%	6.1%	1.8%	-0.6%	-4.8%	-6.1%	-9.4%
19124	0.5%	0.5%	0.5%	0.0%	-0.6%	-0.9%	-1.5%	-1.7%	-2.2%
19125	3.3%	3.3%	3.3%	2.7%	2.2%	1.9%	1.4%	1.3%	0.9%
19126	22.9%	22.9%	22.9%	19.2%	15.5%	13.3%	9.5%	8.3%	5.2%
19131	1.5%	1.5%	1.5%	0.8%	0.0%	-0.5%	-1.3%	-1.6%	-2.4%
19134	11.3%	11.3%	11.3%	7.5%	3.9%	1.8%	-1.6%	-2.7%	-5.3%
19135	10.6%	10.6%	10.6%	7.7%	5.4%	4.1%	2.2%	1.6%	0.2%
19138	-0.6%	-0.6%	-0.6%	-0.9%	-1.1%	-1.2%	-1.4%	-1.5%	-1.6%
19146	0.7%	0.7%	0.7%	-2.5%	-5.8%	-7.7%	-11.1%	-12.2%	-15.0%
19154	9.5%	9.5%	9.5%	5.5%	1.5%	-0.9%	-5.0%	-6.4%	-9.8%
19155	11.2%	11.2%	11.2%	10.0%	9.0%	8.4%	7.6%	7.4%	6.8%
19158	32.6%	32.6%	32.6%	26.9%	22.4%	20.2%	17.0%	16.0%	13.9%
19160	3.3%	3.3%	3.3%	0.8%	-2.1%	-4.0%	-7.6%	-8.8%	-12.3%
19163	-0.4%	-0.4%	-0.4%	0.9%	1.9%	2.5%	3.3%	3.5%	4.1%
19166	17.7%	17.7%	17.7%	-1.4%	-19.0%	-28.8%	-44.5%	-49.4%	-61.1%
19170	18.3%	18.3%	18.3%	12.6%	7.4%	4.6%	0.0%	-1.4%	-4.8%
19172	-2.3%	-2.3%	-2.3%	-5.2%	-7.2%	-8.2%	-9.7%	-10.1%	-11.0%
19174	-8.0%	-8.0%	-8.0%	-9.7%	-11.0%	-11.7%	-12.8%	-13.2%	-14.0%
19179	-6.5%	-6.5%	-6.5%	-9.7%	-13.0%	-15.1%	-18.8%	-20.0%	-23.3%

Tabla 14. Contraste de precipitación total anual Vs PRCPTOT.

ID	Porcentaje de afectación Periodo de Retorno								
	2	5	10	20	50	100	500	1000	10000
19001	6.2%	6.2%	6.2%	5.4%	4.6%	4.1%	3.1%	2.8%	1.9%
19002	8.9%	8.9%	8.9%	6.1%	3.1%	1.3%	-2.1%	-3.2%	-6.1%
19004	1.0%	1.0%	1.0%	0.2%	-0.7%	-1.2%	-2.2%	-2.5%	-3.3%
19005	-1.5%	-1.5%	-1.5%	3.1%	7.6%	10.2%	14.7%	16.1%	19.7%
19007	1.2%	1.2%	1.2%	-0.3%	-1.9%	-2.9%	-4.9%	-5.6%	-7.5%
19008	-0.9%	-0.9%	-0.9%	-1.5%	-2.3%	-2.8%	-3.6%	-3.9%	-4.7%
19009	-0.8%	-0.8%	-0.8%	-0.5%	-0.3%	-0.1%	0.1%	0.2%	0.5%
19011	1.9%	1.9%	1.9%	-0.5%	-3.1%	-4.8%	-7.9%	-9.0%	-12.0%
19015	1.7%	1.7%	1.7%	0.5%	-0.7%	-1.5%	-3.0%	-3.4%	-4.7%
19016	-0.2%	-0.2%	-0.2%	-0.9%	-1.7%	-2.2%	-3.1%	-3.5%	-4.4%
19018	0.9%	0.9%	0.9%	0.4%	-0.1%	-0.4%	-1.0%	-1.2%	-1.7%
19020	12.9%	12.9%	12.9%	10.3%	7.7%	6.3%	3.9%	3.1%	1.3%
19024	-1.0%	-1.0%	-1.0%	-1.7%	-2.4%	-2.9%	-3.6%	-3.9%	-4.5%
19033	12.8%	12.8%	12.8%	9.9%	7.1%	5.5%	2.8%	1.9%	-0.2%
19035	3.7%	3.7%	3.7%	3.4%	3.1%	2.9%	2.5%	2.4%	2.1%
19039	4.1%	4.1%	4.1%	3.9%	3.6%	3.4%	3.1%	3.0%	2.7%
19041	0.1%	0.1%	0.1%	0.5%	1.0%	1.3%	1.9%	2.1%	2.6%
19042	2.8%	2.8%	2.8%	3.2%	3.7%	4.0%	4.6%	4.8%	5.3%
19045	6.1%	6.1%	6.1%	5.2%	4.4%	3.9%	3.1%	2.9%	2.3%
19048	2.7%	2.7%	2.7%	1.8%	0.9%	0.3%	-0.8%	-1.2%	-2.3%
19049	2.9%	2.9%	2.9%	0.6%	-1.8%	-3.3%	-5.9%	-6.8%	-9.0%
19050	4.8%	4.8%	4.8%	2.7%	0.6%	-0.7%	-3.0%	-3.7%	-5.6%
19055	-4.7%	-4.7%	-4.7%	-1.2%	2.2%	4.1%	7.4%	8.5%	11.1%
19056	4.6%	4.6%	4.6%	0.7%	-3.3%	-5.8%	-10.3%	-11.9%	-15.8%
19057	5.2%	5.2%	5.2%	3.2%	1.0%	-0.2%	-2.6%	-3.3%	-5.3%
19058	-2.8%	-2.8%	-2.8%	-0.3%	2.1%	3.4%	5.5%	6.2%	7.8%
19064	0.7%	0.7%	0.7%	0.4%	0.1%	-0.1%	-0.5%	-0.6%	-1.0%
19069	1.2%	1.2%	1.2%	0.1%	-1.1%	-1.8%	-3.0%	-3.4%	-4.4%
19075	-10.1%	-10.1%	-10.1%	-8.9%	-7.4%	-6.5%	-4.7%	-4.0%	-2.1%
19085	-0.5%	-0.5%	-0.5%	-0.6%	-0.7%	-0.8%	-0.9%	-0.9%	-1.1%
19091	2.5%	2.5%	2.5%	2.6%	2.7%	2.7%	2.8%	2.9%	3.0%
19093	8.4%	8.4%	8.4%	7.3%	6.1%	5.2%	3.4%	2.7%	0.6%
19096	-1.3%	-1.3%	-1.3%	-6.1%	-10.6%	-13.2%	-17.3%	-18.6%	-21.8%
19100	7.1%	7.1%	7.1%	2.9%	-1.7%	-4.7%	-10.1%	-12.0%	-17.0%
19104	0.9%	0.9%	0.9%	-2.7%	-6.5%	-8.9%	-13.3%	-14.8%	-18.7%
19105	4.5%	4.5%	4.5%	1.5%	-1.8%	-4.0%	-8.1%	-9.6%	-13.7%
19106	8.8%	8.8%	8.8%	6.6%	4.1%	2.5%	-0.7%	-1.9%	-5.2%
19107	-0.7%	-0.7%	-0.7%	-2.8%	-5.0%	-6.4%	-9.0%	-9.9%	-12.1%
19109	0.3%	0.3%	0.3%	1.1%	1.9%	2.3%	3.0%	3.2%	3.8%
19110	-2.0%	-2.0%	-2.0%	-2.7%	-3.5%	-3.9%	-4.9%	-5.2%	-6.0%
19111	1.4%	1.4%	1.4%	1.5%	1.7%	1.8%	2.1%	2.2%	2.4%
19112	5.8%	5.8%	5.8%	5.0%	4.1%	3.5%	2.2%	1.8%	0.4%
19113	3.4%	3.4%	3.4%	2.4%	1.2%	0.5%	-0.8%	-1.3%	-2.6%
19114	2.9%	2.9%	2.9%	3.2%	3.5%	3.7%	4.0%	4.1%	4.4%
19117	3.6%	3.6%	3.6%	2.8%	1.8%	1.1%	-0.1%	-0.6%	-1.8%
19119	6.5%	6.5%	6.5%	5.2%	3.6%	2.6%	0.6%	-0.1%	-2.0%
19121	13.2%	13.2%	13.2%	10.2%	6.8%	4.5%	0.0%	-1.6%	-6.2%
19124	-1.4%	-1.4%	-1.4%	-1.8%	-2.3%	-2.6%	-3.3%	-3.5%	-4.2%
19125	17.1%	17.1%	17.1%	14.8%	12.3%	10.6%	7.3%	6.1%	2.8%
19126	3.5%	3.5%	3.5%	2.4%	1.3%	0.7%	-0.5%	-0.9%	-1.9%
19131	3.4%	3.4%	3.4%	3.1%	2.8%	2.6%	2.2%	2.1%	1.7%
19134	0.5%	0.5%	0.5%	-0.6%	-1.8%	-2.5%	-3.7%	-4.2%	-5.2%
19135	-4.2%	-4.2%	-4.2%	-3.9%	-3.5%	-3.3%	-2.8%	-2.7%	-2.3%
19138	10.2%	10.2%	10.2%	3.7%	-3.3%	-7.7%	-15.9%	-18.8%	-26.4%
19146	5.9%	5.9%	5.9%	4.3%	2.4%	1.2%	-1.2%	-2.1%	-4.5%
19154	-6.2%	-6.2%	-6.2%	-5.7%	-5.2%	-4.9%	-4.3%	-4.1%	-3.6%
19155	-0.3%	-0.3%	-0.3%	0.4%	1.3%	1.7%	2.6%	2.9%	3.7%
19158	10.6%	10.6%	10.6%	8.9%	7.3%	6.4%	4.8%	4.3%	3.1%
19160	-2.0%	-2.0%	-2.0%	-0.9%	0.3%	1.1%	2.4%	2.8%	4.0%
19163	6.8%	6.8%	6.8%	4.8%	2.7%	1.4%	-1.2%	-2.0%	-4.4%
19166	13.0%	13.0%	13.0%	8.2%	3.0%	-0.2%	-6.2%	-8.3%	-13.7%
19170	18.5%	18.5%	18.5%	13.0%	7.1%	3.4%	-3.4%	-5.7%	-11.8%
19172	-6.7%	-6.7%	-6.7%	-7.8%	-8.9%	-9.4%	-10.4%	-10.7%	-11.4%
19174	3.2%	3.2%	3.2%	-5.9%	-14.6%	-19.6%	-28.1%	-30.8%	-37.4%
19179	-0.2%	-0.2%	-0.2%	-1.6%	-3.2%	-4.2%	-6.3%	-7.0%	-9.0%

Por otro lado, existen estaciones que indican un evidente descenso en las precipitaciones pluviales; tal es el caso de la estación 19033 “Laguna de Sánchez”, donde se observan disminuciones desde 55.4 % para las precipitaciones máximas en 24 horas, 6.6 % y 0.2 % para precipitaciones máximas acumuladas en 5 días y precipitación total anual respectivamente, hasta un 9.0 % y 3.1 % para precipitaciones máximas en 24 horas y acumuladas en 5 días; sin embargo, para precipitaciones totales anuales aumenta a un 12.8 %. Es decir, las precipitaciones en la región, de acuerdo con las estaciones analizadas, tienden a ser más intensas en períodos cortos de duración; no obstante, la precipitación total anual tiende a ser menor, por lo que se presentarán menos lluvias, y los períodos de sequía se extenderán considerablemente.

A continuación, se presentan las Figura 35, Figura 36 y Figura 37, que muestran las estaciones climatológicas analizadas, ubicadas en el Estado, así como si éstas aumentan o disminuyen, de acuerdo con el promedio obtenido de todos los períodos de retorno por cada estación.



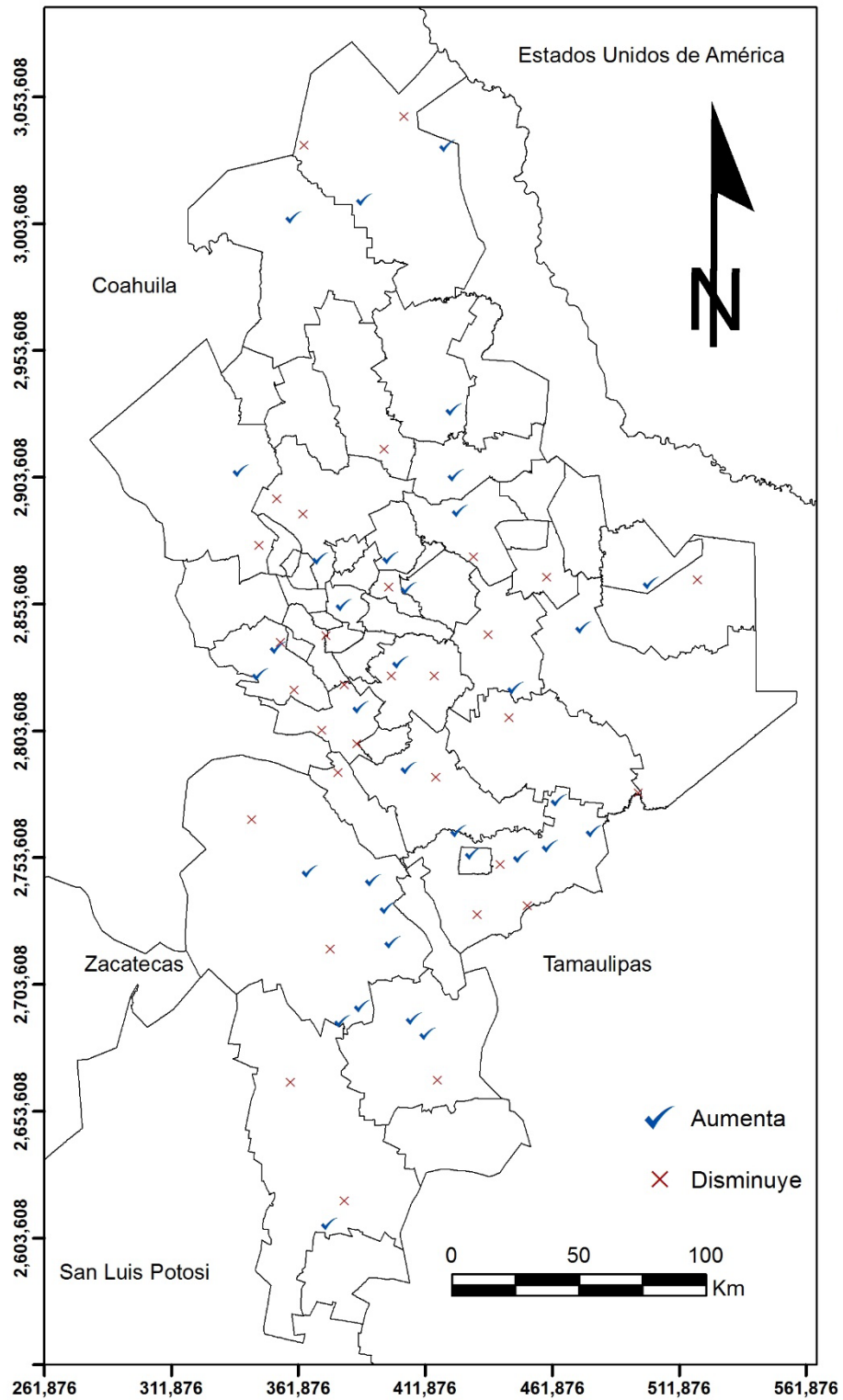


Figura 35. Precipitación máxima en 24 horas Vs Índice Rx1day.

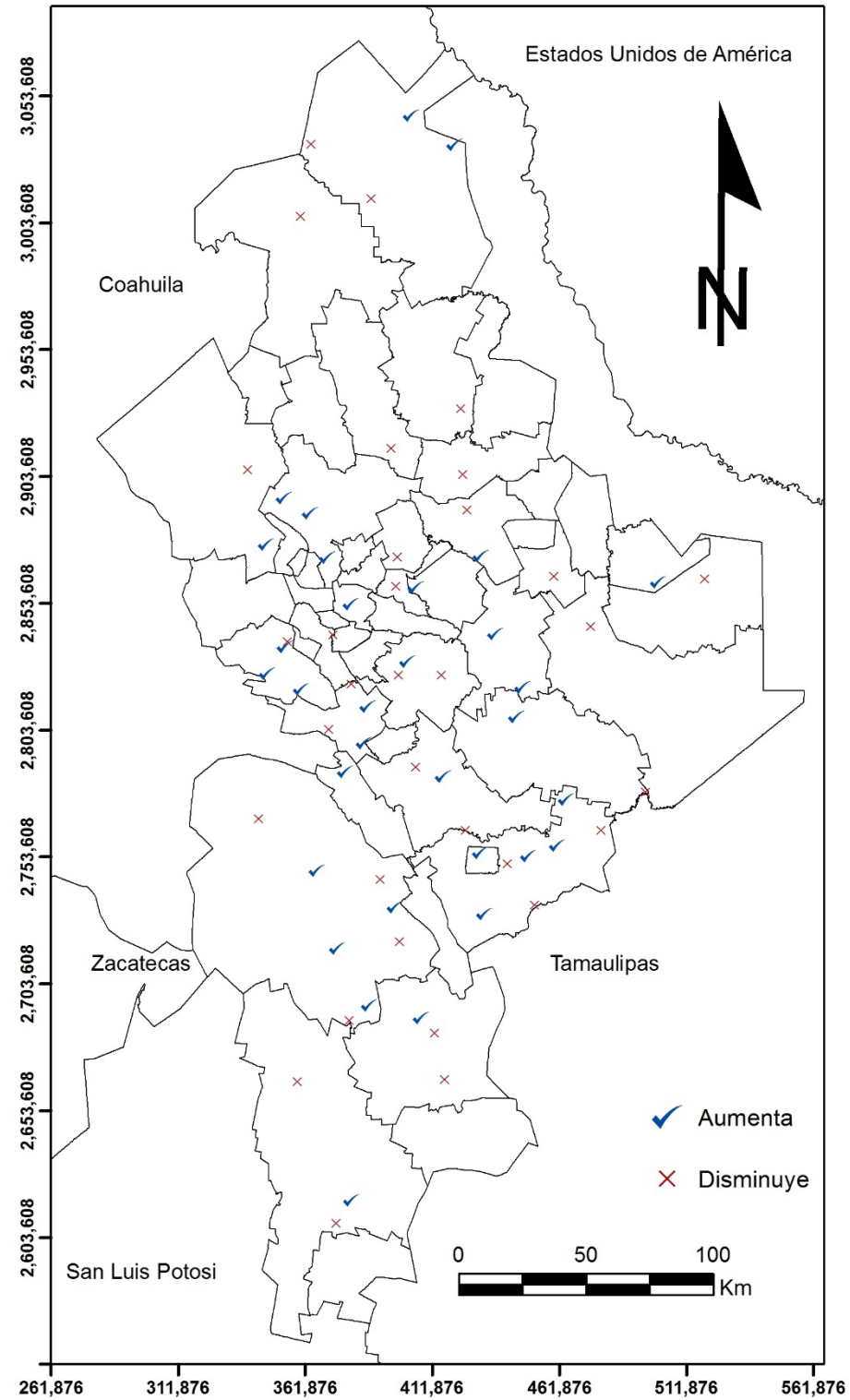


Figura 36. Precipitación máxima acumulada en 5 días Vs índice Rx5day.

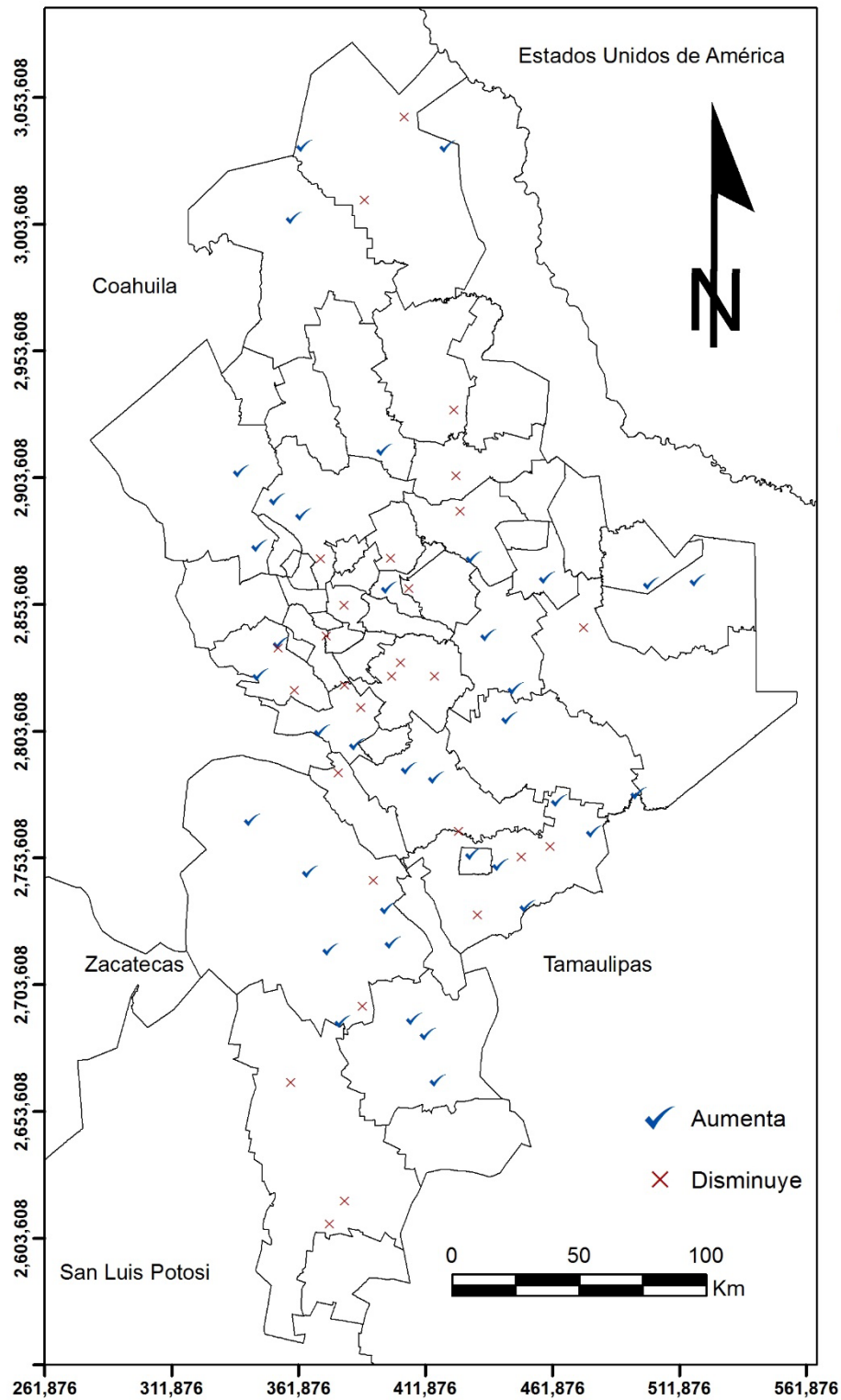


Figura 37. Precipitación total anual Vs Índice PRCPTOT.

## **CAPITULO 4**

### **CONCLUSIONES**

En cuanto al método utilizado se observó que no existen métodos alternos que permitan evaluar el comportamiento del contraste de las precipitaciones contra los índices de cambio climático; éstos asociados con un período de retorno. Con base en esto, se logró aplicar este método a 132 estaciones climatológicas (convencionales), de 172 que existen en el Estado de Nuevo León. No obstante, debido a los criterios de selección y tratamiento, sólo se utilizaron 65 estaciones para la evaluación del comportamiento del contraste. En general, la aplicación de este método comprobó la variación de las precipitaciones pluviales para el Estado de Nuevo León, lo que permitirá tomar decisiones eficaces al momento de diseñar las obras y estructuras hidráulicas necesarias para el manejo, control y regulación de los escurrimientos superficiales.

Con respecto a las estaciones climatológicas, gran parte de éstas cuentan con una considerable longitud de registro de las series de datos, lo que permitió observar, identificar y evaluar dichas estaciones y obtener datos representativos. Se observó que existe gran cantidad de años en los que no se reportó información en las estaciones, lo que conlleva a posibles errores en el análisis. Además, se identificó que el 60 % de las estaciones tienden a un comportamiento homogéneo, mientras que el 40 % restante, no. Esto debido principalmente a que no se contaba con información completa de todas las estaciones, existiendo gran variabilidad en

sus registros. Es por ello que sólo se determinó el contraste para las estaciones homogéneas, resultando en 65 estaciones climatológicas, equivalente al 37.79 % de las estaciones en el Estado.

Con base en los procesos de actualización, control de calidad, homogenización, datos faltantes, pruebas de bondad, distribución de probabilidad, cocientes lluvia-duración, índices de cambio climático y sus tendencias, y predicción, se logró cada objetivo al aplicar satisfactoriamente y obtener los resultados esperados para la evaluación de cada criterio. No obstante, cabe señalar, que los criterios aquí expuestos son los más utilizados, el lector deberá utilizar e investigar los métodos que mejor convengan al análisis que se realice.

De acuerdo con el contraste de precipitaciones realizado, se observó que los índices de cambio climático Rx1day, Rx5day y PRCPTOT, en la mayoría de las estaciones, indican una clara tendencia en creciente para las precipitaciones pluviales en el Estado; sin embargo, cabe aclarar que no indican un incremento en la cantidad de días lluviosos; por otro lado, se esperan más días secos, lo que extiende los períodos de sequía de la región. Desde otro punto de vista, esta tendencia implica lluvias de mayor intensidad y corta duración, generando afectaciones significativas al Estado, tal como sucedió con el huracán “Alex” en 2010 y las lluvias presentadas el día 22 de septiembre de 2014, donde 6 horas de lluvias provocaron caos en la Zona Metropolitana de Monterrey y sus alrededores. Cabe mencionar que no todas las estaciones analizadas presentan un incremento en las precipitaciones; mientras que, en otra proporción, indican una reducción en las precipitaciones.

Por último, cabe resaltar que el análisis de las precipitaciones pluviales es y será indispensable para el diseño hidráulico; por tanto, se debe tomar conciencia sobre la importancia de estos análisis y mejorar los métodos, innovando los procesos y los métodos utilizados.

### **RECOMENDACIONES**

Se recomienda verificar otros métodos para la obtención de datos faltantes, cocientes lluvia-duración, ajustes y predicciones, para así realizar un análisis en detalle y obtener los mejores resultados posibles, de tal forma que se puedan definir criterios óptimos para cada estación, ya que éstos pueden variar dependiendo de su ubicación, su altitud, y las condiciones climáticas de la región, entre otras variables.

A la vez, se recomienda a las autoridades correspondientes crear un sistema eficaz de manejo de la información, debido a que se tienen inconsistencias en las diferentes bases de datos manejados por las autoridades, provocando de esta manera un mal manejo de los datos, así como posibles malinterpretaciones en los resultados obtenidos.

Por último, es recomendable contar con la mayor cantidad de información disponible para el tratamiento de la información, ya que éstos disminuirán significativamente los errores que se puedan estar presentando en los análisis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araiza, J. A., & Campos, D. F. (2000). "Evaluación de los cocientes lluvia-duración (R) y lluvia-frecuencia (F) en 341 sitios de la república mexicana." *XVI Congreso Nacional de Hidráulica*, 743-748.
- Babak, O. (2014). "Inverse distance interpolation for facies modeling." *Stoch Environ Res Risk Assess* 28, 1373-1382.
- Bell, F. C. (1969). "Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 311-327.
- Campos, D. F. (1998). Generalidades. En D. F. Campos Aranda, *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Tercera ed., Vol. I, págs. (1-1), (1-4),). San Luis Potosí, San Luis Potosí, México: Editorial Universitaria Potosina.
- Campos, D. F. (2008). "Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km<sup>2</sup> de la región hidrológica No. 10 (Sinaloa), México." *Agrociencia* 42, 615-627.
- Campos, D. F. (2010). "Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana." *Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol.XI. Núm.2.*, 179-188.
- Campos, D. F., & Gómez, R. (1990). "Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos." *Ingeniería Hidráulica en México*, 39-52.
- Cañizares, M., Barroso, I., & Alfonso, K. (Ene-Feb de 2004). *Datos incompletos: una mirada crítica para su manejo en estudios sanitarios*. Recuperado el 21 de Mayo de 2014, de Gac Sanit: [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0213-91112004000100010](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0213-91112004000100010)
- Cheng-lung, C., & ASCE, M. (1983). "Rainfall Intensity-Duration-Frequency." *Journal Hydraulic Eng.* 109, 1603-1621.
- Chris Huhne, H., & Slingo, J. (2011). *Climate: Observations, projections and impacts*. Devon, United Kingdom: Met Office.

- CLICOM. (2012). *Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN con gráficas del CICESE*. Obtenido de <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Comisión Europea. (Diciembre de 2009). *Cambio Climático en América Latina*. Recuperado el 19 de Mayo de 2014, de European Commission: [http://ec.europa.eu/europaid/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/europaid/index_es.htm)
- Comisión Europea. (Agosto de 2010). "El papel de la naturaleza en el cambio climático." Unión Europea: EU Ecolabel.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. (2007). *México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Primera ed.). México: S y G editores.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. (2009). *México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Primera ed.). (S. E. Solar, Ed.) México: INE-SEMARNAT.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. (2012). *México Quinta Comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático* (Primera ed.). (S. Grupo Communicare, Ed.) México: INECC-SEMARNAT.
- Comisión Nacional del Agua. (2006). *El Agua en México* (Primera ed.). (S. d. Naturales, Ed.) México: CONAGUA.
- Díaz, H. F., Grojean, M., & Graumlich, L. (2003). Climate Variability and change in high elevation regions: past, present and future. *Climatic Change*, 1-4.
- Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E., & Ambenje, P. (2000). Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 417-425.
- Ediger, V., Akar, S., & Ugurlu, B. (2006). Forecasting production of fossil fuel sources in Turkey using a comparative regression and ARIMA model. *Energy Policy* 34, 3836-3846.
- Esteban-Vea, P., Prohom-Duran, M., & Aguilar, E. (2012). Tendencias recientes e índices de cambio climático e la temperatura y la precipitación en Andorra,



- Pirineos (1935-2008). *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, 167, 87-106. doi:10.3989/Pirineos.2012.167005
- ETCCDI/CRD. (2013). *Software - climate change indices*. Obtenido de RHtest - RClimdex: <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>
- Faruk, D. (2010). A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23, 586-594.
- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2013). *Huracán Alex en Nuevo León, la memoria. Riegos, testimonios y acción social. Unidad de Planeación*. Monterrey, Nuevo León, México: Secretaría de Desarrollo Social.
- González Casimiro, M. P. (2009). *Análisis de series temporales: Modelos ARIMA*. País Vasco, España: SARRIKO-ON. Obtenido de <http://www.sarriko-online.com/cas/descarga.htm>
- González Casimiro, M. P. (2009). *Técnicas de predicción económica*. País Vasco, España: SARRIKO-ON. Obtenido de <http://www.sarriko-online.com/cas/descarga.htm>
- Greenpeace. (2010). *México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación*. (M. J. Cárdenas, C. Navarro, A. Simón, & A. Aguilar, Edits.) México: Greenpeace México.
- Herron, C. A. (2013). *Agua y Cambio Climático en México 2007-2012: Análisis y Recomendaciones a Futuro*. México: CONAGUA; PREMIA.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1986). *Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León* (Primera ed.). México, Distrito Federal, México: INEGI.
- IPCC. (1997). *Informe especial del IPCC, Impactos regionales del Cambio Climático: Evaluación de la Vulnerabilidad*. (R. Watson, M. Zinyowera, R. Moss, & D. Dokken, Edits.) Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Primera ed.). (R. K. Pachauri, & A. Reisinger, Edits.) Ginebra, Suiza: IPCC.

- Karl, T. R., Knight, R. W., Easterling, D. R., & Quayle, R. G. (1996). Indices of Climate Change for United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(2), 279-292.
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes - Workshop summary. *Weather and Climate Extremes*, 42, 3-7.
- Lawless, J. (1982). *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. New York: John Wiley & Sons.
- Magaña Rueda, V., Graizbord, B., Buenfil Friedman, J., & Gómez Mendoza, L. (2009). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México* (Primera ed., Vol. II). (J. Buenfil Friedman, Ed.) México, México: INE-SEMARNAT.
- Magaña, V., & Neri, C. (2005). El Clima y su relación con el agua en México. En *Documento de trabajo número 6 del Programa Agua, Medio Ambiente y Sociedad*. México: El Colegio de México - Universidad Nacional Autónoma de México.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., & Whetton, P. (2000). Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 427-436.
- Mermoz, O., & García, R. (2008). Distribuciones Univariantes de Probabilidad. // *Congreso Argentino de Ingeniería Industrial*.
- Minitab® 16.2.3. (2012). *MINITAB® and all other trademarks and logos for the Company's products and services are the exclusive property of Minitab Inc. All other marks referenced remain the property of their respective owners*. Obtenido de <http://www.minitab.com/es-mx/>
- Nickerson, D. M., & Madsen, B. C. (2005). Nonlinear regression and ARIMA models for precipitation chemistry in East Central Florida from 1978 to 1997. *Environment Pollution* 135, 371-379.
- ONU/WWAP (Naciones Unidas/Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). (2003). *1er Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de*

- los Recursos Hídricos en el Mundo: Agua para todos, agua para la vida.* UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). París, Nueva York, Oxford: Ediciones UNESCO, Mundi-Prensa.
- ONU/WWAP (Naciones Unidas/Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). (2006). *2do Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: El agua, una responsabilidad compartida.* UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). Paris: Ediciones UNESCO.
- Organización Meteorológica Mundial. (1992). *Proceedings of the International Workshop on Network Design Practices.* Ginebra: Coblenza.
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). Guía de Prácticas Hidrológicas. En WMO/OMM/BMO (Ed.). Ginebra, Suiza: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Meteorológica Mundial. (2008). *Guía de Prácticas Hidrológicas* (Sexta ed., Vol. I). (WMO/OMM/BMO, Ed.) Ginebra, Suiza: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Meteorológica Mundial. (2009). *Guía de prácticas hidrológicas* (Sexta ed., Vol. II). (WMO/OMM/BMO, Ed.) Ginebra, Suiza: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). Volumen I - Aspectos mundiales. En *Manual del sistema Mundial de Observación, Volumen I - Aspectos mundiales* (Vol. OMM No. 544, págs. II-1, II-8 a II-9). Ginebra, Suiza: WMO/OMM/BMO.
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas climatológicas* (Tercera ed., Vol. OMM N° 100). (WMO/OMM/BMO, Ed.) Ginebra, Suiza: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). En *El Tiempo, El Clima, y El Agua, Motores de nuestro futuro* (Vol. OMM No. 1084, págs. 5, 9, 13). Ginebra, Suiza: WMO/OMM/BMO.

- Paulhus, J., & Kohler, M. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Rev.* 80, 129-133.
- Peterson, T. C. (Abril de 2005). "Climate change indices." *WMO Bulletin*, 54(2), 83-86.
- Pizarro, R., Ramirez, C., & Flores, J. P. (2003). Análisis comporativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque* 24, 31-38.
- R Core Team. (2012). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Obtenido de <http://www.r-project.org/>
- Reyes Aguilar, P. (2007). *Metodología de análisis con series de tiempo*. ICICM. Obtenido de [www.icicm.com/files/SeriesDeTiempoComp.doc](http://www.icicm.com/files/SeriesDeTiempoComp.doc)
- Ricci, V. (2005). *Fitting Distributions with R*. Obtenido de <http://www.fsf.org/licenses/licenses.html#FDL>
- Rodríguez López, Y., & Marrero de León, N. V. (2011). "Análisis regional de series de lluvias máximas: consideraciones." *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXII, págs. 34-45.
- Romero, S. N. (2012). "La revolución en la toma de desiciones estadísticas: el p-valor." *Telos*, 14(3), 439-446. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99324907004>
- Salas, J. (1993). *Analysis and Modeling of Hydrological Time Series*. In: Maidment. New York: McGraw-Hill.
- Salazar, A., & Maser, O. (2010). "México ante el Cambio Climático, Resolviendo Necesidades Locales con Impactos Globales." Union de Cientificos Comprometidos con la Sociedad, A.C.
- Sillmann, J., & Roeckner, E. (2008). "Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change." *Climate Change*, 86, 83-104. doi:10.1007/s10584-007-9308-6
- Smith, J. (1993). *Precipitation*. In: Maidment, D.R. New York: McGraw Hill.
- Stedinger, J., Vogel, M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). *Frequency analysis of extremes events*. New York: McGraw-Hill.

- Teegavarapu, R. (2007). "Use of universal function approximation in variance-dependent interpolation technique: an application in Hydrology." *Journal of Hydrology* 332, 16-29.
- Vázquez Aguirre, J. L. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. (Primera ed.). (I. N. Ecología, Ed.) México, México: SEMARNAT.
- Vide, M. (2007). *aspectos económicos del cambio climático en España*. Barcelona: Caixa Catalunya.
- Villavicencio, J. (s.f.). *Introducción a Series de Tiempo*. San Juan, Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico. Obtenido de <http://esta.uprrp.edu/facultad/mecu-villavicencioJ.php#>
- Wang, X., & Feng, Y. (2010). *RHtestV3 User Manual*. Toronto, Ontario, Canada: Environment Canada.
- WWAP (World Water Assessment Programme). (2012). *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. Paris, France: UNESCO.
- WWF. (2012). *Adaptación al Cambio Climático*. España: FACTSHEET.
- Yadav, R., & Balakrishnan, M. (2014). *Comparative evaluation of ARIMA and ANFIS for modeling of wireless network traffic time series*. Obtenido de Springer: <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2014/1/15>
- Zhang, X., & Yang, F. (2004). *Manual de Usuario RClimDex (1.0)*. Canada: Environment Canada.
- Zimmerman, D. C., Pavlik, C., Ruggles, A., & Armstrong, M. P. (1999). "An experimental comparasion of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting." *Mathematical Geology* 31, 375-390.

## ANEXOS

### A.- ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE SERIES TEMPORALES CON “R”

#### 1. Formas de configurar una serie en “R”. La función `ts`.

Para hacer alguna descomposición de series temporales, con la función *decompose*, la serie debe estar configurada de manera que sea reconocible el período. Por ejemplo:

- Los datos: matriculaciones de turismos entre enero de 1960 y diciembre de 1999.
- Supongamos que los tenemos en una columna:  
`x<-scan ('matricul.dat')`
- Para configurarlos como serie temporal, en “r” hay que usar la función “ts” indicando el periodo:  
`x<-ts(x, start=1960, frequency=12)`

Los ficheros “R” del tipo “ts” ya están configurados como series temporales y, por tanto, no necesitan definirse como tales usando un comando del tipo `x<-ts(x, start=1959, frequency=12)`. Por ejemplo:

```
data (AirPassengers) Plot (AirPassengers) data(co2) plot (co2)
```

#### 2. Representación gráfica:

Plot (x)

#### 3. Análisis descriptivo elemental: tendencia, estacional, residual.

- a. *Aditivo* :  $X_t = T_t + S_t + e_t$
- b. *Multiplicativo* :  $X_t = T_t S_t + e_t$

Forma de realizarlo con R:

Plot (decompose (co2))

Plot (decompose (AirPassengers, type="multiplicative"))

#### 4. Cómo calcular la tendencia. Un ejemplo de cálculo de tendencia determinística:

# Se va a ajustar un polinomio de segundo grado `tendencia<-lm (ser~t+I (t^2))`

`T<-predict (tendencia)`

`Plot (ser)`

`Lines (c (t), T, col="red", lty="dashed")`

`Summary (tendencia)`

*Para calcular la tendencia con "decompose":*

`TendenciaAir<-decompose (AirPassengers) $trend plot (TendenciaAir)`

*Para calcular la tendencia con "filter":*

`plot(filter(AirPassengers,filter=rep(1/3,3),sides=2,method="convolution"))`

`plot(filter(AirPassengers,filter=rep(1/5,5),sides=2,method="convolution"))`

`plot(filter(AirPassengers,filter=rep(1/9,9),sides=2,method="convolution"))`

#### 5. Para calcular y representar la función de autocorrelaciones:

`acf (x) plot (acf (x))`

## 6. Transformación de Box-Cox

```
library(car) plot(ts(box.cox(AirPassengers, _), start=1949, frequency=12))
```

### ***GENERACIÓN DE MODELOS ARMA y ARIMA:***

#### 7. Para simular una serie de acuerdo con un modelo ARMA prefijado:

```
x <- arima.sim(n=10000, model=list(ar=c(0.3, 0.6), ma=c(2,3)), sd=1)
```

#### 8. Para simular una serie de acuerdo con un modelo ARIMA prefijado:

```
x<-arima.sim(10000, model=list(order=c(2, 1, 0), ar=c(0.7, 0.1)), sd=1)
```

#### 9. Para diferenciar una serie:

```
x1<-diff.ts(x)
```

La diferenciación se deshace con:

```
Diffinv(x, lag, xi)
```

### ***ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN MODELOS ARMA y ARIMA:***

#### 10. Con la función arma

```
x<-arima.sim(10000, model=list(order=c(2, 0, 0), ar=c(0.7, 0.1)), sd=1) arma(x,  
order=c(2, 0, 0))
```

*Nota: (Para usar la función "arma" hay que cargar el paquete "tseries")*



## 11. Con la función arima

```
x<-arima.sim (10000, model=list (order=c (2, 1, 0), ar=c (0.7, 0.1)), sd=1) arima (x,
order=c (2, 1, 0))
```

## **PREDICCIÓN EN MODELOS ARMA y ARIMA**

### 12. Función predict

```
predict (arima (x, order = c (2, 0, 0)), n.ahead = 12)
Prediction<-predict (arima(x, order=c (p, d, q)), n.ahead=12) $pred
Error<-predict (arima (x, order=c (p, d, q)), n.ahead=12) $se
```

## **SELECCIÓN DEL ORDEN $p, q$ EN UN MODELO ARMA ( $p, q$ )**

### 13. Se utiliza el criterio de Akaike. Por ejemplo, para elegir entre un modelo AR(2) y AR(1) para unos datos “x”:

```
x<-arima.sim (10000, model=list (order=c (2, 0, 0), ar=c (0.7, 0.1)), sd=1)
AIC (arima (x, order=c (2, 0, 0)), arima (x, order=c (1, 0, 0)))
# Se obtiene la siguiente salida:
```

	df	AIC
arima (x, order = c (2, 0, 0))	4	28249.52
arima (x, order = c (1, 0, 0))	3	28347.77

*Esto significa que el modelo AR (2) debe ser preferido frente al AR (1) en este caso, porque el valor del estadístico de Akaike es menor.*

**DIFERENTES TESTS ÚTILES**

- 14. Test de Dickey-Fuller para contrastar la hipótesis nula de que hay una raíz unidad en el polinomio autoregresivo: `adf.test` (está en el paquete “`tseries`”)
- 15. Test de Jarque-Bera y de Shapiro-Wilk para normalidad: `jarque.bera.test`, `shapiro.test`
- 16. Test de Ljung-Box para la hipótesis de independencia: `Box.Test`

***Disponible en:***

Universidad Autónoma de Madrid

<https://www.uam.es/ss/Satellite/es/home/>

O directamente en el enlace:

[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/acuevas/docencia/doct/Series-temporales-con-R.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/acuevas/docencia/doct/Series-temporales-con-R.pdf)

## B.- CÓDIGOS EN R

### 1. Código en R para simular un ruido blanco

#Se simulan 100 números aleatorios que sean ruido blanco con media cero y varianza uno

```
#rnorm (n, mean = 0, sd = 1)
```

```
g=rnorm (100, 0, 1)
```

```
par (mfrow=c (1,2))
```

```
ts.plot (g, main="Nii (0, 1)")
```

```
acf (g, main="Autocorrelación Simple", ylim=c (-1,1), ci.col="black", ylab="")
```

### 2. Código en R para simular un camino aleatorio.

```
w=rnorm (100)
```

```
x=w
```

```
for (t in 2:100) x[t] <- x [t - 1] + w[t]
```

```
par (mfrow=c (2, 2))
```

```
ts.plot (x, main="Camino aleatorio Xt")
```

```
acf (x, main="Autocorrelación Simple de Xt", ylim=c (-.5,.5), ci.col="black", ylab="")
```

```
d=diff (x)
```

```
ts.plot (d, main="Primera diferencia de Xt")
```

```
acf (d, main="Autocorrelación Simple de d", ylim=c (-.5,.5), ci.col="black", ylab="")
```

### 3. Código en R para simular un proceso auroregresivo de orden 1 AR(1)

```
# Simulación de un proceso AR (1) con phi=0.4
```

```
Layout (matrix (c (1, 1, 2, 3), 2, 2, byrow = TRUE))
```

```
AR=arima.sim (list (order=c (1, 0, 0), ar=.4), n=100)
```

```
plot (AR, ylab=" ", main=(expression (AR (1)~~~phi==+.4)))
```

```
acf (AR, main="Autocorrelación Simple", ylim=c (-.5, .5), ci.col="black", ylab="") pacf
(AR, main="Autocorrelación Parcial", ylim=c (-.5, .5), ci.col="black")
```

#### 4. Código en R para simular un proceso de media móvil de orden MA (1)

```
#Simulación de un proceso MA(1) con theta=0.5
layout(matrix(c(1,1,2,3), 2, 2, byrow = TRUE)) MA=arima.sim(list(order=c(0,0,1),
ma=.5), n=100)
plot(MA, ylab=" ", main=(expression(MA(1)~--theta==+.5)))
acf(MA, main="Autocorrelación Simple",ylim=c(-.5,.5),ci.col="black",ylab="")
pacf(MA,main="Autocorrelación Parcial",ylim=c(-.5,.5),ci.col="black")
```

#### 5. Código en R para un proceso ARMA

```
# Se utilizará la serie del cambio porcentual mes a mes del consumo de energía
eléctrica de Puerto
#Rico de febrero de 2002 a diciembre 2010.
CP.CEE=read.delim("clipboard")
attach(CP.CEE)
CEE=ts(CP.CEE,star=c(2002,2),frequency=12)
layout(matrix(c(1,1,2,3), 2, 2, byrow = TRUE))
ts.plot(CEE,main="Consumo de energía eléctrica 02/2002-12/2010", ylab="Cambio
Porcentual")
acf(CEE, main="Autocorrelación Simple",ci.col="black",ylab="",ylim=c(-.5,.5))
pacf(CEE,main="Autocorrelación Parcial",ci.col="black",ylim=c(-.5,.5))

#Modelo 1 tentativo ARMA(2,1) arma21<-arima(CEE,order=c( 2,0,1))
aic21<-arma21$aic
aic21=550.5935
par(mfrow=c(1,2))
```

```
acf(arma21$residuals,main="AutocorrelacionSimple",ci.col="black",ylab="",ylim=c(-.5,.5))
pacf(arma21$residuals,main="AutocorrelacionParcial",ci.col="black",ylim=c(-.5,.5))

#Modelo 2 tentativo ARMA(2,2)
arma22<-arima(CEE,order=c( 2,0,2)) aic22<-arma22$aic
aic22=552.5884
par(mfrow=c(1,2))
acf(arma22$residuals,main="AutocorrelacionSimple",ci.col="black",ylab="",ylim=c(-.5,.5))
pacf(arma22$residuals,main="AutocorrelacionParcial",ci.col="black",ylim=c(-.5,.5))

#Modelo 3 tentativo ARMA(1,1)
arma11<-arima(CEE,order=c( 1,0,1))
aic11<-arma11$aic
aic11=550.2842
layout(matrix(c(1,1,2,3), 2, 2, byrow = TRUE))
ts.plot(arma11$residuals,main="Residuales del modelo ARMA (1, 1)", ylab="",
xlab="")
acf(arma11$residuals,main="AutocorrelaciónSimple",ci.col="black",ylab="",ylim=c(-.5,.5))
pacf(arma11$residuals,main="Autocorrelación Parcial",ci.col="black",ylim=c(-.5,.5))

# predicciones
fit=fitted.values(arma11)
fore = predict(arma11, n.ahead=5) fore
ICS=fore$pred+fore$se ICI=fore$pred-fore$se
```

## 6. Código en R para un ARIMA

```
# Se utilizará la serie del Índice de Precios al Consumidos de Puerto Rio de
```

```
# enero de 1984 a febrero de 2011
IPCPR=read.delim("clipboard")
attach(IPCPR)
IPC=ts(IPCPR,star=c(1984,1),frequency=12)
ts.plot(IPC,main="Índice de Precios al Consumidor 01/1984-02/2011", ylab="IPC")

#Primer diferencia ten=diff(IPC,lag=1,difference=1) layout(matrix(c(1,1,2,3), 2, 2,
byrow = TRUE))
ts.plot(ten,main="Primera diferencia del IPC",xlab="año",ylab="")
acf(ten, main="Autocorrelación Simple",ci.col="black",ylab="",ylim=c(-.5,.5))
pacf(ten,main="Autocorrelación Parcial",ci.col="black",ylim=c(-.5,.5))

#Modelo 1 tentativo ARIMA(2,1,1)
ar1<-arima(IPC,order=c( 2,1,1))

#Modelo 2 tentativo ARIMA(1,1,2)
ar2<-arima(IPC,order=c( 1,1,1))

#Modelo 3 tentativo ARIMA(1,1,1)
ar3<-arima(IPC,order=c( 1,1,1))

#Análisis de residuales del modelo 3 res=ar3$residuals
layout(matrix(c(1,1,2,3), 2, 2, byrow = TRUE))
ts.plot(res,main="Residuales de ARIMA(1,1,1)",xlab="año",ylab="")
acf(res, main="Autocorrelación Simple",ci.col="black",ylab="",ylim=c(-.5,.5))
pacf(res,main="Autocorrelación Parcial",ci.col="black",ylim=c(-.5,.5))

###prueba de estacionariedad de Dickey-Fuller para los residuales del modelo
seleccionado adf.test(res)
```

###Prueba de independencia de Box-Pierce para los residuales del modelo  
seleccionado Box.test(res)

# IPC estimado por ARIMA

fit=fitted.values(ar3)

ten=cbind(IPC,fit)

ts.plot(ten,col=8:10,main="IPC original y estimado por  
ARIMA",xlab="año",ylab="IPC") bandas <- expression("IPC original", "IPC con  
ARIMA(1,1,1)")

legend(2005,70, bandas,lty=1, col=c(8,1),cex=.9)

# Pronósticos del IPC

fore = predict(ar3, n.ahead=5)

ts.plot(fit,fore\$pred,col=8:10,xlab="año",ylab="IPC",main="Pronósticos del IPC")

lines(fore\$pred,col=8:10)

lines(fore\$pred+fore\$se, lty="dashed", col=1)

lines(fore\$pred-fore\$se, lty="dashed", col=1)

***Disponible en:***

Instituto de Estadísticas de Puerto Rico

<http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/>

O directamente en el enlace:

[http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4\\_BxecUaZmq=](http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4_BxecUaZmq=)

## **RESUMEN AUTOBIOGRAFICO.**

**Raúl Guzmán Sagreiros**

Candidato para el Grado de  
Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental

**Tesis:** COMPORTAMIENTO DEL CONTRASTE DE PRECIPITACIONES  
ASOCIADOS A UN PERÍODO DE RETORNO (TR) Y LOS  
ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO.

**Campo de Estudio:** Ambiental.

### **Biografía:**

Nacido en Monterrey, Nuevo León el 5 de Enero de 1987, hijo de **Raúl Guzmán Salazar y María Julia Sagreiros Pérez.**

### **Educación:**

Ingeniero Civil.  
Facultad de Ingeniería Civil.  
Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Agosto 2007 – Julio 2012.

### **Experiencia Profesional:**

Técnico – Investigador del Departamento de Hidráulica.  
Instituto de Ingeniería Civil.  
Jefe directo: M.C. Ricardo Alberto Cavazos González.  
Octubre de 2012 a la fecha.

### **Contacto:**

*Teléfono oficina:* 83 29 40 00 *extensión:* 7263.  
*Correo electrónico:* [raul\\_gs1987@hotmail.com](mailto:raul_gs1987@hotmail.com) o [rgsagreiros@gmail.com](mailto:rgsagreiros@gmail.com)